



TUGAS AKHIR - MO141326

**ANALISIS PENGARUH TEGANGAN SISA TERHADAP
LOCAL BUCKLING PADA PENGELASAN PIPA BAWAH
LAUT**

DANNY SATRIA WIBAWANTO
NRP. 4312 100 031

Dosen Pembimbing :
Nur Syahroni, ST., M.T., PH.D
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., PH.D

Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



BACHELOR THESIS - MO141326

**ANALYSIS OF WELD INDUCED RESIDUAL STRESSES
ON THE *LOCAL BUCKLING* PIPELINE**

DANNY SATRIA WIBAWANTO
NRP. 4312 100 031

Supervisors :

NUR SYAHRONI, ST., M.T., Ph.D

YOYOK SETYO HADIWIDODO, S.T., M.T., Ph.D

Department of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH TEGANGAN SISA TERHADAP *LOCAL BUCKLING* PADA PENGELASAN PIPA BAWAH LAUT

TUGAS AKHIR

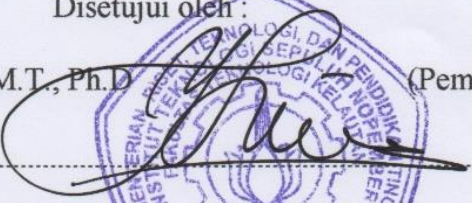

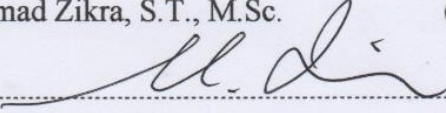
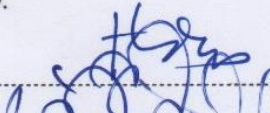
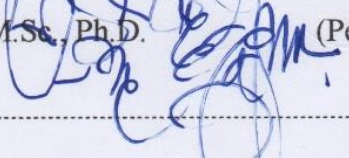
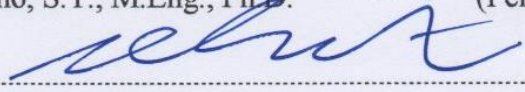
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DANNY SATRIA WIBAWANTO

NRP. 43 12 100 031

Disetujui oleh :

1. Nur Syahroni, ST., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 2)

3. Dr. Eng. Muhammad Zikra, S.T., M.Sc. (Penguji 1)

4. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. (Penguji 2)

5. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.Sc., Ph.D. (Penguji 3)

6. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng., Ph.D. (Penguji 4)


Surabaya, July 2016

**ANALISIS PENGARUH TEGANGAN SISA TERHADAP *LOCAL*
BUCKLING PADA PENGELASAN PIPA BAWAH LAUT**

Nama Mahasiswa : Danny Satria Wibawanto
NRP : 4312100031
Jurusan : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Nur Syahrone, ST., M.T., Ph.D
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRAK

Dalam penelitian ini dilakukan analisa pemodelan numeris untuk melakukan simulasi pengaruh tegangan sisa pada pengelasan melintang pipa. Tegangan sisa yang ditinjau dalam penelitian ini adalah tegangan memanjang dan tegangan tangensial. Adanya pengaruh tegangan sisa dijadikan sebagai kondisi *imperfection* untuk mengidentifikasi pengaruhnya terhadap *local buckling*. Dalam analisa ini terbagi atas 2 pemodelan yakni, model pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dan dengan pengaruh tegangan sisa. Analisa *local buckling* dilakukan dengan memberikan beban momen pada kedua model pipa hingga didapatkan beban kritis yang menyebabkan pipa mengalami *buckling*. Dari hasil analisa tersebut dilakukan pengecekan terhadap hubungan beban momen dan kurvatur pada sebuah grafik untuk mengetahui pengaruh tegangan sisa terhadap respon *local buckling*. Dimana besar momen kritis untuk pipa dengan tegangan sisa adalah 940 k-Nm dan pipa tanpa tegangan sisa adalah 970 k-Nm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa memiliki kapasitas kurvatur (regangan) yang lebih rendah yakni sebesar . Hal tersebut memberikan kerentanan untuk terjadi *local buckling*.

Kata Kunci : tegangan sisa, pengelasan pipa, *Local Buckling*

***EFFECT OF WELD INDUCED RESIDUAL STRESSES ON THE
LOCAL BUCKLING***

Student Name : Danny Satria Wibawanto
Reg. Number : 4312100031
Department : Teknik Kelautan FTK-ITS
Supervisors : Nur Syahroni, ST., M.T., Ph.D
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRACT

This analysis is about numerical modelling of effect welding residual stress on pipe girth weld. Welding residual stress that are reviewed in this study is longitudinal stress and hoop stress. An effect of welding residual stress is used as imperfection condition to identified the respon of Local Buckling. In this study take with 2 model that are pipe model with residual stress and pipe without residual stress. The analysis of Local Buckling is done by giving momen load for two pipe model until critical load that make the buckling response. From the analysis is checked using relation of moment and curvature to know an effect of local buckling response. Where critical moment for the pipe with residual stress has value 940 k-Nm and pipe without residual stress has value 970 k-Nm. The result of this simulation shows if pipe with residual stress has lower strain capacity that gives more response of Local Buckling.

Key Word : residual stress, pipe welding, Local Buckling

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Analisa	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori.....	8
2.2.1 Sumber Panas Pengelasan	8
2.2.2 Pengaruh Tegangan Pada Proses Pengelasan.....	10
2.2.3 Simulasi FEM Pada Pengelasan Melintang Pipeline	13
2.2.4 Analisis <i>Local Buckling</i>	22
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian	30
3.2.1 Studi Literatur	30
3.2.2 Pengumpulan Data	30
3.2.3 Pemodelan	32
3.2.4 Simulasi Model	32
3.2.6 Validasi Model	33
3.2.7 Analisa dan Pembahasan.....	33
3.3 Deskripsi Pemodelan dan Simulasi.....	33
3.3.1 Pemodelan Geometri.....	33

3.3.2 Simulasi Pengelasan.....	37
3.3.3 Simulasi Tegangan Sisa	39
3.3.4 Simulasi <i>Local Buckling</i>	42
BAB IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1 Perhitungan Heat Flux.....	45
4.2 Analisa Geometri	46
4.2.1. Pemilihan Bentuk Elemen Meshing	46
4.2.2. Sensitifitas Meshing	48
4.3 Hasil Validasi	49
4.3.1 Validasi Temperatur.....	49
4.3.2 Validasi Tegangan Sisa	52
4.4. Analisa Simulasi Pengelasan	53
4.5 Analisa Simulasi Tegangan Sisa	54
4.5.1 Tegangan Sisa Longitudinal.....	54
4.5.2 Tegangan Sisa Tangensial.....	58
4.5.3 Simulasi <i>Local Buckling</i>	61
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN-LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. variasi model	5
Tabel 2. 1. Efisiensi busur pada beberapa jenis pengelasan	9
Tabel 3. 1. Spesifikasi model pipeline	31
Tabel 3. 2. Data material properties berdasarkan perubahan temperatur.....	31
Tabel 4. 1. Tabel perbandingan elemen tetrahedral dan hexahedral	47
Tabel 4. 2. Loadstep Pembebanan.....	50
Tabel 4. 3. Hasil momen kritis	61
Tabel 4. 4. Validasi momen kritis	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Fenomena <i>Local Buckling</i> pada pipa	2
Gambar 1. 2. Tegangan Sisa Longitudinal dan Tangensial	3
Gambar 1. 3. Mekanisme terjadinya tegangan sisa.....	3
Gambar 2. 1. Tegangan termal pada model three bars.....	11
Gambar 2. 2. tegangan tarik tekan pada balok	11
Gambar 2. 3 Tegangan sisa pada pengelasan pipa	12
Gambar 2. 4. Distribusi tegangan sisa pada pengelasan pipa	12
Gambar 2. 5. Model 3-dimensi solid 70.....	14
Gambar 2. 6. Model 3-dimensi solid 185.....	15
Gambar 2. 7. Volume control pada konduksi panas 1-dimensi	18
Gambar 2. 8. Ilustrasi aliran panas secara konveksi	18
Gambar 2. 9. Vektor tegangan	21
Gambar 2. 10. Ilustrasi <i>Local Buckling</i>	22
Gambar 2. 11. Penampang samping pipa.....	23
Gambar 2. 12. Potongan melintang pipa.....	24
Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian.....	29
Gambar 3. 2. Geometri Pipeline.....	30
Gambar 3. 3. Butt-weld pengelasan	30
Gambar 3. 4. Ramberg-Osgood Parameter	32
Gambar 3. 5. Diagram alir pemodelan geometri.....	34
Gambar 3. 6. Hasil meshing model.....	35
Gambar 3. 7. Diagram alir simulasi pengelasan.....	37
Gambar 3. 8. Diagram simulasi tegangan sisa	39
Gambar 3. 9. Kondisi batas model	40
Gambar 3. 10. Standart alur simulasi <i>Local Buckling</i>	42
Gambar 3. 11. Import model	43
Gambar 3. 12. simulasi <i>Local Buckling</i>	44
Gambar 3. 13. Module analisa buckling	44
Gambar 4. 1. Titik referensi peninjauan (kiri) dan isometric plane (kanan)	46
Gambar 4. 2. elemen hexahedral (kiri) dan elemen tetrahedral (kanan)	47
Gambar 4. 3. Distribusi tegangan sisa longitudinal.....	48
Gambar 4. 4. Sensitifitas meshing	49
Gambar 4. 5. Alur pembebanan pengelasan.....	51
Gambar 4. 6. Validasi temperatur	51
Gambar 4. 7. Historical Temperature Pada Beberapa Node	52
Gambar 4. 8. Validasi Tegangan Sisa.....	52
Gambar 4. 9. Urutan pengelasan pipa pada tiap-tiap loadstep	53
Gambar 4. 10. Tegangan sisa arah memanjang.....	55

Gambar 4. 11. Tegangan sisa memanjang pada 0 deg	55
Gambar 4. 12. Tegangan Sisa memanjang pada 90 deg	56
Gambar 4. 13. Tegangan Sisa memanjang pada 180 deg	57
Gambar 4. 14. Tegangan Sisa memanjang pada 180 deg	57
Gambar 4. 15. Tegangan sisa arah tangensial	58
Gambar 4. 16. Tegangan Sisa tangensial pada 0 deg	59
Gambar 4. 17. Tegangan Sisa tangensial pada 90 deg	59
Gambar 4. 18. Tegangan Sisa tangensial pada 180 deg	60
Gambar 4. 19. Tegangan Sisa tangensial pada 180 deg	61
Gambar 4. 20. Distribusi tegangan memanjang 0 deg	63
Gambar 4. 21. Distribusi tegangan memanjang 0 deg	64
Gambar 4. 22. Distribusi tegangan memanjang 180 deg	65
Gambar 4. 23. Distribusi tegangan memanjang 270 deg	66
Gambar 4. 24. Distribusi tegangan tangensial 0 deg.....	67
Gambar 4. 25. Distribusi tegangan tangensial 90 deg.....	67
Gambar 4. 26. Distribusi tegangan tangensial 180 deg.....	68
Gambar 4. 27. Distribusi tegangan tangensial 270 deg.....	69
Gambar 4. 28. Hubungan beban momen dan deformasi.....	70
Gambar 4. 29. Deformasi pada model pipa tanpa tegangan sisa	71
Gambar 4. 30. Deformasi pada model pipa dengan tegangan sisa.....	71
Gambar 4. 31. Momen dan kurvatur pada model tanpa tegangan sisa	72
Gambar 4. 32. Momen dan kurvatur pada model dengan tegangan sisa.....	72

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A. PEMODELAN ANSYS

LAMPIRAN B. DATA PEMODELAN

LAMPIRAN C. DATA ANSYS

LAMPIRAN D. DATA PERHITUNGAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam industri perancangan bangunan lepas pantai umumnya desain struktur tersusun atas material baja yang disambung menjadi satu dengan proses pengelasan. Harsono (2000) menyatakan bahwa pengelasan merupakan metode yang digunakan secara universal dalam penyambungan material logam. Salah satu desain bangunan lepas pantai yang membutuhkan disiplin ilmu pengelasan adalah penyambungan pipa bawah laut.

Pada penyambungan pipa bawah laut terbagi atas dua tipe, yakni penyambungan secara memanjang (*longitudinal weld*) dan penyambungan secara melintang (*transverse weld*). Penyambungan secara memanjang dilakukan di *workshop* sehingga pengontrolan terhadap proses pengelasan seperti *post weld heat treatment* (PWHT) dapat dilakukan untuk menghasilkan hasil sambungan pengelasan yang baik. Namun pada penyambungan melintang yang dilakukan secara *in-situ* dilapangan, yang mana kesempurnaan hasil pengelasan akan sangat sulit dicapai khususnya pada daerah sambungan antar dua pipa (*girth*).

Integritas struktur pada pengelasan sambungan melintang merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena rentan terhadap kegagalan. Fenomena penting pada proses pengelasan pipa secara melintang yang perlu diperhatikan adalah pengaruh tegangan sisa (Chi Fai, 1994). Tegangan sisa merupakan tegangan yang tertinggal pada daerah sambungan setelah proses pengelasan. Adanya pengaruh tegangan sisa disebabkan oleh deformasi plastis karena perbedaan suhu pada material induk selama proses pengelasan berlangsung. Tegangan sisa tersebut dapat memberikan tegangan tarik di sekitar dan pada daerah pengelasan yang berpengaruh terhadap pengurangan kapasitas dukung material. Itu mengapa adanya tegangan sisa dapat mempengaruhi integritas struktur.

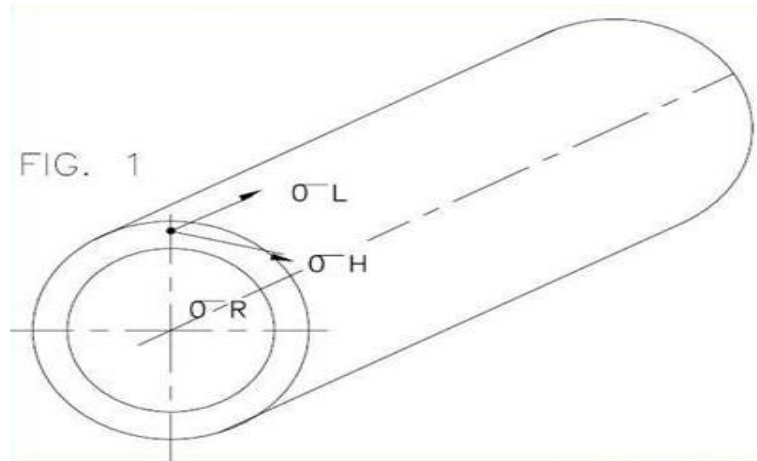
Lee *et. al* (2013) melakukan penelitian pada penyambungan melintang pipa dengan memperhatikan adanya pengaruh tegangan sisa.

Tegangan sisa akibat pengelasan pipa dapat menghasilkan distribusi tegangan yang berupa tegangan tangensial (*hoop stress*) dan tegangan aksial (*longitudinal stress*) di sepanjang pipa sesuai pada Gambar 1.2. Adanya tegangan yang timbul akibat pengelasan dapat memperbesar harga tegangan *ekuivalen von mises* yang bekerja pada pipa. Al-Showaiter (2015) menyatakan bahwa adanya tegangan sisa dapat berpengaruh pada berkurangnya kapasitas regangan dan puncak momen pada material. Adanya pengaruh pada hal tersebut akan memberikan kerentanan suatu pipa mengalami fenomena *local buckling* seperti pada Gambar 1.1.



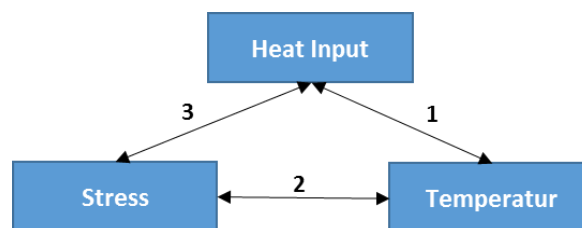
Gambar 1. 1. Fenomena Local Buckling pada pipa

Local buckling pada pipa merupakan suatu fenomena pembengkokan akibat adanya beban aksial atau momen yang melebihi batas tegangan yield material. Ketika hal tersebut terjadi maka dapat menyebabkan pipa mengalami bentuk oval dan penekukan lokal. Kim (1992) melakukan penelitian secara eksperimental pada simulasi pengelasan model silinder yang mempertimbangkan fenomena *local buckling*. Dari hasil analisa diperoleh *local buckling* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yakni, perbandingan antara diameter dengan ketebalan, eksentrisitas pipa, dan distribusi tegangan akibat pengelasan.



Gambar 1. 2. Tegangan Sisa Longitudinal dan Tangensial

Penelitian yang dilakukan oleh Lee *et. Al* (2013) hanya menganalisa pengaruh distribusi tegangan akibat tegangan sisa pada pipa tetapi analisa pengaruh *local buckling* masih belum dilakukan. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Kim (1992) jauh lebih berkembang yakni telah melakukan analisa pengaruh tegangan sisa pada model silinder terhadap pengaruh respon *local buckling* yang masih dilakukan secara eksperimental. Namun analisa secara eksperimental membutuhkan waktu dan biaya yang kurang efisien. Maka dari itu, pada penelitian ini akan dilakukan sejumlah simulasi numeris dengan bantuan software metode elemen hingga yang mana mekanisme penelitian pada pengaruh tegangan sisa terhadap respon *local buckling* dideskripsikan seperti pada Gambar 1.3. Simulasi yang dilakukan akan terbagi atas 2 jenis yakni, analisa temperatur dan analisa struktural. Analisa temperatur dilakukan untuk memodelkan adanya pengaruh tegangan sisa sebagai akibat hasil pengelasan. Sedangkan analisa struktural dilakukan dengan memberikan beban momen yang bekerja secara transien hingga pipa mengalami *buckling*. Dalam analisa ini akan dibandingkan dua jenis pipa yang mempertimbangkan dengan dan tanpa melibatkan tegangan sisa.



Gambar 1. 3. Mekanisme terjadinya tegangan sisa

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah

- a. Bagaimana mengetahui distribusi tegangan sisa pada pengelasan melintang pipa ?
- b. Bagaimana pengaruh tegangan sisa pengelasan terhadap respon *local buckling* yang terjadi pada pipa ?
- c. Bagaimana menganalisa pengaruh *local buckling* terhadap kapasitas dukung struktur pipa ?

1.3 Tujuan Analisa

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah

- a. Melakukan simulasi numerik pengelasan melintang struktur pipa yang mempertimbangkan adanya pengaruh tegangan sisa dengan menghitung distribusi tegangan yang ditimbulkan.
- b. Melakukan perbandingan model dengan dan tanpa tegangan sisa yang selanjutnya pada kedua model tersebut diberikan beban tekuk secara *transient* pada salah satu ujung pipa hingga diperoleh momen kritis yang menyebabkan *buckling*.
- c. Melakukan analisa terhadap perbandingan antara momen dengan kurvatur untuk mengetahui kapasitas dukung suatu struktur pipa hingga terjadi *buckling*.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pada analisa ini difokuskan pada batasan masalah sebagai berikut,

- a. Proses pengelasan menggunakan jenis las SMAW dengan prosedur pengelasan *single phase* sesuai dengan data *Welding Procedure Sequence (WPS)* pada pengelasan pipa bawah laut oleh PT. ZEE ENGINEERING.
- b. Filler metal pada pengelesan tidak dimodelkan.
- c. Pengaruh aliran panas (*heat transfer*) secara radiatif pada pengelasan diabaikan.
- d. Besarnya beban momen diberikan secara bertahap hingga pipa mengalami *buckling*.

- e. Data kurva parameter ramberg-osgood material diperoleh dari software OFFPIPEassistant.
- f. Material properties yang digunakan memiliki karakteristik *isotrphic*.
- g. Simulasi pemodelan dilakukan dengan variasi sesuai Tabel 1.1,

Tabel 1. 1. variasi model

Model A	Model B
Sambungan pipeline pada daerah girth dianggap sempurna tanpa terjadi tegangan sisa.	Sambungan pipeline pada daerah girth mengalami tegangan sisa.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kajian literatur mengenai analisa tegangan sisa dan *local buckling* pada pipa telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Pada sub-bab ini dijelaskan perkembangan penelitian terkait analisa tegangan sisa pada pengelasan melintang pipa serta responnya terhadap *local buckling*.

Pada tesis doktornya, Darmadi (2014) melakukan analisis tegangan sisa dengan simulasi FEM pada sambungan pengelasan melintang pipa (*girth weld*). Pada simulasi tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa dalam memodelkan sambungan pengelasan pada pipa terdapat tiga aspek yang turut diperhatikan yakni, analisa termal, metalurgi, dan mekanik. Hal tersebut dilakukan karena setelah proses pengelasan berlangsung terdapat sejumlah tegangan yang timbul akibat terjadinya perbedaan temperature antara daerah pengelasan (*weld metal*) dengan *base metal*. Dan ketika proses pendinginan berlangsung tegangan tersebut masih tertinggal pada daerah disekitar lasan, atau disebut juga dengan tegangan sisa (*residual stress*).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ghodsi (1994) yakni, pada analisis pipa dengan teori elastis-plastis yang dilakukan dengan membandingkan terjadinya *local buckling* pada pipa yang dengan dan tanpa memperhatikan pengelasan. Simulasi dilakukan dengan memberikan beban aksial, internal pressure, dan momen bending yang bekerja pada ujung-ujung pipa. Hasilnya dilakukan plot grafik berupa momen dan kurvatur yang terjadi. Dari hasil grafik tersebut didapat bahwa pipa dengan memperhatikan pengelasan memiliki konsentrasi tegangan yang lebih tinggi sebagai akibat adanya pengaruh tegangan sisa yang bekerja secara melintang dan memanjang pada pipa yang dihasilkan dari tegangan termal dari pengelasan. Sehingga adanya distribusi tegangan tersebut memberikan kerentanan pipa mengalami *local buckling*.

Lee (2013) melakukan simulasi pengelasan melintang pipa berbasis software metode elemen hingga. Analisa yang dilakukan berupa pengaruh

tegangan sisa terhadap pengaruh *internal pressure*. Dari hasil simulasi *internal pressure* yang mempengaruhi adanya secondary bending momen yang berdampak pada penambahan distribusi tegangan sisa yakni, tegangan melintang dan aksial pada pipa.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Al-Showaiter (2015) berupa analisa numeris terhadap adanya pengaruh tegangan sisa pada pengelasan melintang pipa. Parameter studi dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga untuk mengevaluasi adanya pengaruh tegangan sisa terhadap pengelasan melintang, eksentrisitas sambungan, tegangan internal, dan beban aksial. Hasil terhadap pengaruh parameter-parameter tersebut dijadikan acuan untuk mengetahui respon *Local Buckling* melalui grafik momen-kurvatur.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sumber Panas Pengelasan

Hasil panas yang dihasilkan oleh pengelasan mengakibatkan terjadinya siklus termal pada daerah pengelasan (weldment) dan daerah disekitar lasan yang masih dipengaruhi oleh panas (HAZ). Pada daerah tersebut akan terjadi perubahan tegangan termal, pemuaian, dan tegangan sisa serta distorsi. Maka hal tersebut terjadi akibat panas yang dihasilkan oleh busur las yang dapat menghasilkan sumber panas dari konversi energi listrik. Persamaan yang digunakan untuk menghitung energi tersebut adalah,

$$H = V.I \text{ watt} \quad (2.1)$$

Dimana,

H = Daya Listrik (watt)

V = tegangan busur las (volt)

I = arus busur las (ampere)

Energi panas pada proses pengelasan diekspresikan oleh persamaan berikut,

$$H = 60 \cdot \frac{VI}{v} \quad (2.2)$$

Dimana,

v = kecepatan busur las (mm/s)

Pada umumnya tidak semua energi listrik yang dikonversikan menjadi energi panas sepenuhnya digunakan untuk memanaskan elektroda dan logam induk, terdapat sejumlah energi yang dilepaskan ke lingkungan atau mengalami disipasi. Sehingga persamaan energi panas efektif dari pengelasan dapat dirumuskan dalam persamaan berikut,

$$Q = \eta VI \quad (2.3)$$

Dimana,

Q = energi panas efektif dari pengelasan (Joule)

η = efisiensi energi las

Harga nilai efisiensi untuk setiap jenis pengelasan dapat dilihat sesuai pada Tabel 2.1 (Masubuchi, 1980) berikut,

Tabel 2. 1. Efisiensi busur pada beberapa jenis pengelasan

Jenis Pengelasan	Efisiensi Busur
SAW (steel)	0,95
SMAW (steel)	0,80
GMAW(CO2-steel)	0,85
GMAW(Ar-steel)	0,70
GTAW(Ar-steel)	0,40
GTAW(He-Al)	0,60
GTAW(Ar-Al)	0,40

Dalam penentuan besarnya *heat flux* yang dibebankan pada permukaan elemen yang dilas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut,

$$q_{el} = q_e \frac{A_l}{A_f} \quad (2.4)$$

Dimana,

A_l = luasan permukaan elemen yang dikenai beban *heat flux*

A_f = luasan *flux* yang dihasilkan elektroda

q_e = *heat flux* yang dihasilkan elektroda

$$\text{Untuk } q_e = \frac{Q_i}{A_e} \quad (2.5)$$

Dan

$$\text{Untuk } A_f = b \times v \times t \quad (2.6)$$

Dimana,

Q_i = Efektif *heat input*

A_e = Luas elektroda

b = lebar area pengelasan (mm)

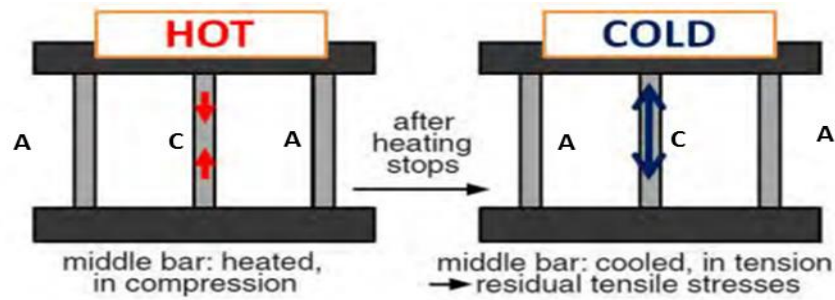
v = kecepatan pengelasan (mm/s)

t = waktu per area pembebanan (detik)

2.2.2 Pengaruh Tegangan Pada Proses Pengelasan

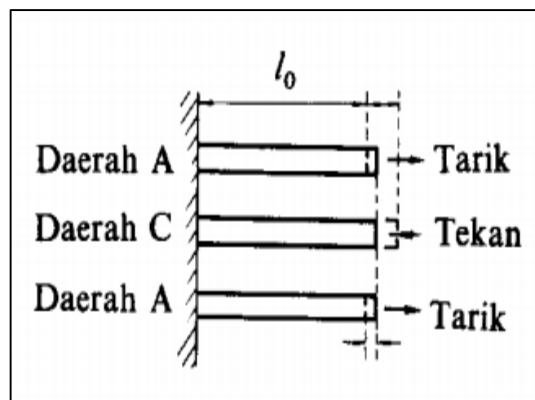
2.2.2.1 Teori Tegangan Sisa

Tegangan sisa terjadi sebagai akibat dari proses pengelasan yang mana menyebabkan terjadinya perbedaan distribusi temperatur pada *base metal*. Tegangan ini biasanya disebut tegangan termal (*stress temperature*). Tegangan termal dapat menyebabkan terjadinya regangan sebagai akibat pemuaian suatu benda akibat panas. Pemuaian tersebut akan terus terjadi hingga keselarasan temperatur pada daerah pengelesan tercapai. Keselarasan temperatur terjadi ketika suhu daerah pengelasan sama dengan suhu *base metal*. Tegangan yang masih tertinggal pada daerah pengelasan pada saat struktur telah kembali pada suhu mula-mula disebut tegangan sisa. Ilustrasi terjadinya tegangan sisa dapat digambarkan dengan percobaan yang dilakukan oleh Baek dkk. (2015) seperti berikut,



Gambar 2. 1. Tegangan termal pada model three bars

Pada Gambar 2.1 tegangan sisa terjadi pada balok bagian C (tengah), yang mana pada balok C dipanaskan hingga terjadi pemuaian sesuai pada saat kondisi pengelasan. Pemuaian pada balok C ditahan oleh balok A yang memiliki dimensi jauh lebih besar. Sehingga sebagai hasil pada kedua ujung balok A mengalami tekan dan pada kedua ujung balok C mengalami tarik seperti pada Gambar 2.2. Apabila pada balok C dianalogikan seperti berlangsungnya pengelasan, maka pada balok tersebut akan terjadi tegangan tekan yang dapat melebihi nilai tegangan yieldnya. Sehingga pada balok C terjadi tegangan tekan plastis. Ketika terjadi proses pendinginan yang mana aliran panas dialirkan ke lingkungan. Pada balok C akan kembali menyusut sebagai akibat penurunan suhu ke temperatur awal. Akan tetapi karena pada balok C telah mengalami tegangan tekan plastis maka panjang dari balok C akan lebih pendek dari panjang mula-mula. Sehingga pada ujung-ujung balok C akan tersimpan sebuah tegangan yang mana disebut sebagai tegangan sisa.

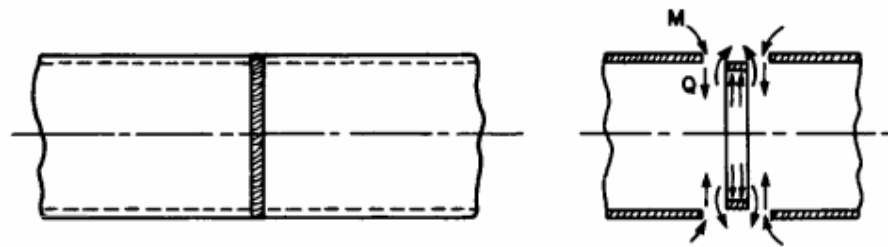


Gambar 2. 2. tegangan tarik tekan pada balok

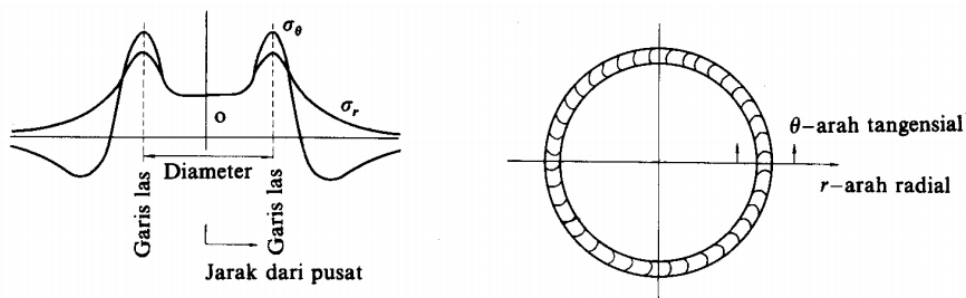
2.2.2.2 Tegangan Sisa Pada Pengelasan Pipa

Distribusi tegangan sisa pada pengelasan melintang pipa sangatlah kompleks. Daerah dengan konsentrasi tegangan paling tinggi terjadi pada

daerah *girth* yang mana pada daerah tersebut terjadi tegangan geser dan bending momen, seperti terlihat pada Gambar 2.3. Harsono (2000) menyatakan bahwa distribusi tegangan sisa pada pengelasan pipa selalu simetris terhadap satu garis yang melalui pusat lingkaran seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 3 Tegangan sisa pada pengelasan pipa



Gambar 2. 4. Distribusi tegangan sisa pada pengelasan pipa

Besarnya pengaruh tegangan sisa pada pengelasan pipeline dipengaruhi oleh,

- Diameter dan ketebalan pipa
- Desain sambungan
- Prosedur pengelasan

2.2.2.3 Distribusi Tegangan Akibat Tegangan Sisa

Pada pengelasan yang dilakukan pada pipa akan menghasilkan tegangan sisa dan deformasi. Adanya hal tersebut dapat mempengaruhi timbulnya tegangan yang bekerja di daerah disekitar lasan. Lee (2013) menyatakan bahwa tegangan yang timbul akibat pengelasan pipa dapat berupa tegangan tangensial (hoop stress) dan tegangan longitudinal (aksial stress). Definisi dari tegangan tersebut adalah,

- Tegangan Melintang

Tegangan yang bekerja secara tangensial pada permukaan pipa.

- Tegangan Longitudinal

Tegangan yang bekerja searah dengan sumbu penampang pipa.

2.2.2.4 Resultan Tegangan Sisa Pada Pipeline

Pada sub-bab ini akan dibahas keterkaitan antara distribusi tegangan yang dihasilkan dari pengaruh tegangan sisa hasil pengelasan.

Resultan tegangan dari tegangan memanjang dan tangensial disebut juga dengan tegangan *von-mises*. Pada tegangan *von-mises* dapat dijadikan kriteria untuk menentukan batas elastis material pada saat mencapai titik luluhnya. Persamaan tegangan *von-mises* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut,

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta} \quad (2.7)$$

Dimana,

σ_p = tegangan *von-mises* (MPa)

2.2.3 Simulasi FEM Pada Pengelasan Melintang Pipeline

2.2.3.1 Teori Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga diperkenalkan pertama kali oleh Turner (1956), yang digunakan sebagai teknik komputasi suatu rekayasa *engineering* model dengan geometri dan boundary condition yang cukup kompleks. Konsep dasar dari Finite Element Analysis (FEA) adalah menyederhanakan suatu domain menjadi suatu elemen diskrit yang lebih sederhana. Kemudian penyelesaian masalah diselesaikan pada elemen-elemen tersebut. Selanjutnya digabung kembali secara menyeluruh untuk mendapatkan solusi global. Usaha pendiskritan ini dilakukan agar memudahkan dalam analisa karena adanya keterbatasan dalam analisa secara global.

Secara umum tahapan dalam perumusan metode elemen hingga adalah sebagai berikut,

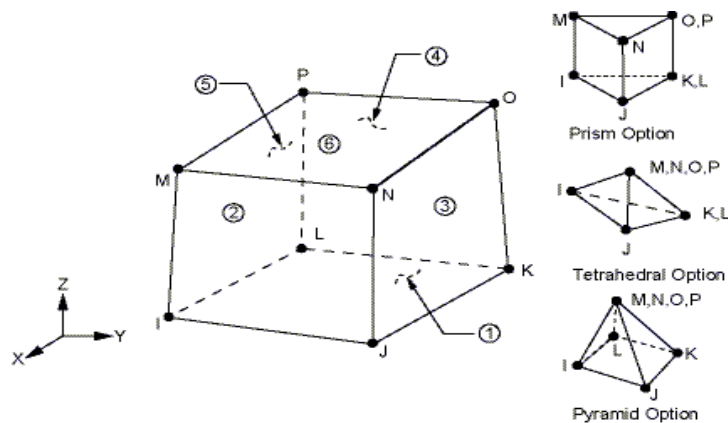
a. Pendiskritan dan Pemilihan Elemen

Pada tahap ini dilakukan pembagian model kedalam suatu sistem yang ekuivalen yang terdiri atas node dan elemen. Pemilihan jenis elemen haruslah disesuaikan dengan tingkah laku fisik material.

Pada analisa tegangan sisa terdapat 2 jenis elemen berdasarkan ANSYS Help 16.0 yang akan digunakan yakni,

- **Elemen Solid 70**

Elemen solid 70 merupakan elemen 3-dimensi yang digunakan untuk analisa termal pada Gambar 2.5. Elemen ini memiliki 8 node dengan satu derajat kebebasan yakni temperature di tiap-tiap node. Pada elemen tersebut dapat digunakan untuk mengaplikasikan analisa *steady state* dan *transient termal*.

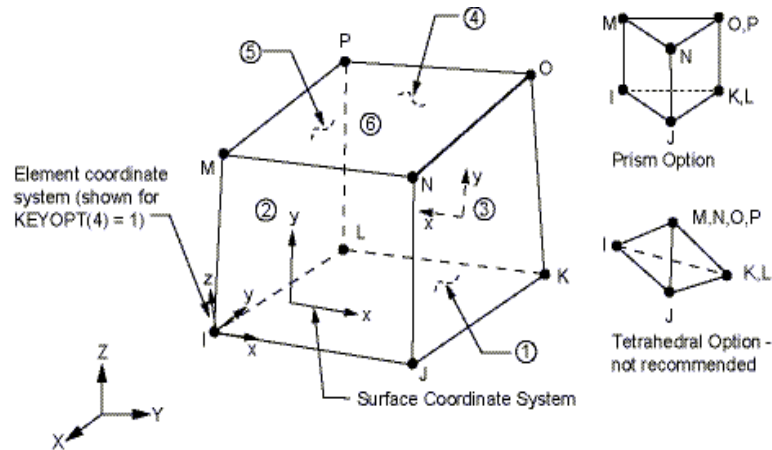


Gambar 2. 5. Model 3-dimensi solid 70

Bentuk geometri, lokasi node, dan koordinat sistem elemen dapat dilihat pada Gambar. Bentuk elemen terdiri atas prisma, tetrahedral, dan piramid. Dimana beban pada elemen yang dapat diaplikasikan untuk analisa termal berupa konveksi, heat flux, dan radiasi yang dibebankan pada permukaan elemen.

- **Elemen Solid 185**

Elemen solid 185 digunakan untuk menganalisa struktur solid. Elemen terdiri atas tiga derajat kebebasan pada tiap-tiap node yang terdiri atas translasi pada sumbu x, y, dan z. Geometri, lokasi node, dan sistem koordinat elemen diterangkan pada Gambar 2.6. Dimana elemen terdiri atas 8 node dan ortotropik. Dimana Beban struktural dapat diaplikasikan pada permukaan elemen



Gambar 2. 6. Model 3-dimensi solid 185

b. Menentukan Fungsi Displasmen

Pada tahap ini dilakukan pemilihan fungsi displasmen pada tiap-tiap elemen. Fungsi yang didefinisikan pada tiap-tiap elemen menggunakan nilai dari node. Fungsi yang dipakai terdiri dari polinomial linear, kuadratik, polynomial kubik.

c. Mendefinisikan hubungan regangan-displasmen dan tegangan regangan

Displasmen regangan dan tegangan regangan digunakan untuk menyusun persamaan elemen hingga. Pada kasus deformasi 1-dimensi pada arah sumbu-x yang mana regangan (ϵ_x) dengan displasmen memiliki hubungan persamaan sebagai berikut,

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.8)$$

d. Menentukan Persamaan Matrik Kekakuan Elemen

Pengembangan matrik kekakuan elemen dan persamaan elemen dipengaruhi oleh nilai koefisien kekakuan. Pada analisa termal pengelasan, matrik kekakuan elemen yang digunakan didasarkan pada hukum Fourier yakni,

$$\frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \text{ or } \mathbf{k}^{(e)} \boldsymbol{\theta}^{(e)} = \mathbf{q}^{(e)} \quad (2.9)$$

Dimana,

- θ = vektor termal
 k = karakteristik matrik elemen
 q = vektor elemen gaya

e. Penggabungan Persamaan Elemen dan Penentuan Kondisi Batas

Pada tahap ini, elemen-elemen beserta persamaan kesetimbangan simpulnya digabung menjadi satu menjadi suatu persamaan global. Pada persamaan (2.9) diatas merupakan persamaan elemen, yang mana apabila persamaan untuk tiap-tiap elemen yang digabungkan menjadi satu disebut persamaan sistem global yakni,

$$[K][\theta] = [Q] \quad (2.10)$$

Dimana,

$[K]$ = Kekakuan Global

$[\theta]$ = Global Termal

$[Q]$ = *Global Force*

f. Menyelesaikan Persamaan Derajat Kebebasan Yang belum Diketahui

Pada tahap ini, harga dari besaran yang tidak diketahui pada matrik kekakuan global dapat diperoleh dengan menggunakan metodel eliminasi dan iterasi.

g. Menentukan Regangan dan Tegangan Elemen

Pada analisa regangan dan tegangan dapat diperoleh dari tahap sebelumnya karena memuat persamaan displasmen.

h. Interpretasi Hasil

Pada tahap ini dilakukan analisa pada bagian struktur yang paling rentan menerima beban. Analisa tersebut dapat berupa deformasi dan tegangan yang digambarkan dalam bentuk *graphis interface*.

3.2.3.2 Transfer Panas Pada Pengelasan

Analisa termal menjadi fundamental dasar dalam memodelkan pengelasan. Simulasi pengelasan dimodelkan dalam bentuk pergerakan sumber panas (*heat source*). Pergerakan sumber panas tersebut dapat

dimodelkan kedalam bentuk area q'' ($J/s.m^2$) yang diaplikasikan pada permukaan model struktur. Selain itu pemodelan sumber panas juga dapat diaplikasikan kedalam bentuk volume q''' ($J/s.m^3$) yang diaplikasikan pada bodi struktur. Adanya pengaruh panas yang dihasilkan *heat source* menyebabkan terjadinya proses transfer panas ke bagian *base metal* yang lebih dingin baik secara konduksi, konveksi, dan radiasi. Adanya pengaruh radiasi tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan maka dapat diabaikan (Roberto, 2014). Berikut ini merupakan material properti yang harus diperhatikan dalam mensimulasikan pengelasan (Darmadi, 2014),

a. Konduktivitas

Incropera dan DeWitt telah mensimulasikan konduktivitas termal material dalam bentuk aliran transport energi termal. Jika sumber panas hanya ditransformasikan dalam arah sumbu-x (Gambar 2.7) sehingga harga konduktivitas yang digunakan dapat menggunakan persamaan Fourier Law,

$$q_x = -K_{xx} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.11)$$

Dimana,

q_x = konduksi panas sumbu-x di dalam kontrol volume (kW/m^2)

K_{xx} = Konduktivitas Termal pada arah sumbu x ($kW/m^\circ C$)

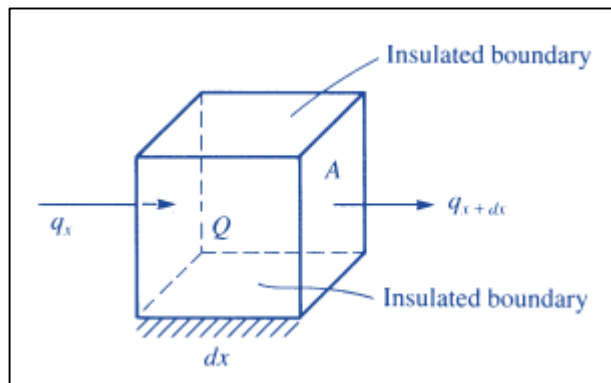
T = Temperatur ($^\circ C$)

dT/dX = Perubahan Temperatur ($^\circ C/m$)

Pada persamaan (2.11) aliran panas, perbedaan temperatur dengan nilai konduktivitas yang tinggi akan menambah heat flux untuk setiap unit waktu. Pada jenis material *istropic* harga konduktivitas termal untuk 2-sumbu yang lain (y dan z) adalah sama. Pada persamaan (2.11) konduksi panas yang berada diluar kontrol volume Gambar 2.7 yakni pada permukaan $x + dx$ dirumuskan sebagai berikut,

$$q_{x+dx} = -K_{xx} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x+dx} \quad (2.12)$$

Dimana gradien temperatur pada persamaan (3.12) berada pada $x + dx$.



Gambar 2. 7. Volume control pada konduksi panas 1-dimensi

b. Konveksi

Konveksi adalah aliran panas dengan media perantara fluida. Sebagaimana pada konduksi, perbedaan suhu pada solid *base metal* dengan fluida pada *weld metal* menyebabkan terjadinya transfer energi dari daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah (Gambar 2.8). Persamaan *heat transfer* secara konveksi diperoleh dari persamaan hukum pendinginan Newton,

$$q_h = h (T - T_{\infty}) \quad (2.13)$$

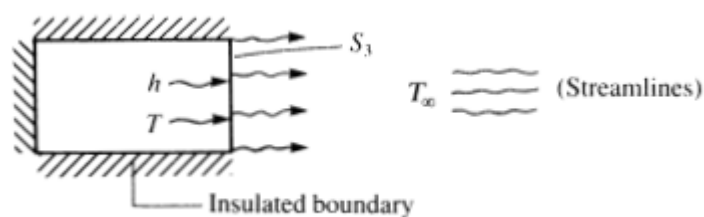
Dimana,

q_h = aliran panas secara konveksi (kW/m^2)

h = koefisien konveksi ($kW/m^{\circ}C$)

T = Temperatur pada permukaan solid ($^{\circ}C$)

T_{∞} = Temperatur fluida pengelasan ($^{\circ}C$)



Gambar 2. 8. Ilustrasi aliran panas secara konveksi

3.2.3.3 Analisa Termal Pada Aliran Panas Pengelasan

Pada bukunya, Logan (1994) menurunkan persamaan aliran panas secara konduksi pada aliran 1-dimensi dengan menggunakan persamaan energi konservatif,

$$E_{in} + E_{generated} = \Delta U + E_{out} \quad (2.14)$$

$$q_x A dt + Q A dx dt = c(\rho A dx) dT + q_{x+dx} A dt + q_h P dx dt \quad (2.15)$$

Dimana,

q_x = aliran konduksi panas pada sumbu x (kW/m^2)

A = Luasan yang terkena aliran panas (m^2)

Q = sumber energi panas (kW/m^3)

c = *specific heat* ($kWh/kg^\circ C$)

q_{x+dx} = aliran panas pada permukaan boundary

q_h = aliran konveksi panas (kW/m^2)

P = keliling permukaan A (m)

Dengan memasukkan pers (2.11), (2.12), dan (2.13) pada persamaan (2.15) maka akan didapatkan persamaan aliran panas (heat transfer) untuk 1-dimensi dengan melibatkan konduksi dan konveksi adalah,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{hP}{A} (T - T_\infty) \quad (2.16)$$

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Pilipenko (2001) persamaan aliran panas untuk model 3-dimensi (*tri-dimensional*) dirumuskan dengan memperluas persamaan (2.11) dan (2.12) sebagai fungsi aliran temperatur untuk 3-dimensi pada sumbu x, y, dan z dan menambahkan persamaan tersebut ke dalam persamaan (2.16) sehingga menjadi,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{hP}{A} (T - T_\infty) \quad (2.17)$$

Dengan kondisi batas untuk temperatur yang diberikan pada persamaan (2.11), perubahan temperatur pada persamaan (2.12), dan energi yang hilang akibat konveksi pada persamaan (2.13). Persamaan aliran panas pada model solid adalah,

$$- \left[\left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = h (T - T_{\infty}) \quad (2.18)$$

3.2.4.4 Analisa Mekanis Pada Pengukuran Tegangan Sisa

Tegangan sisa terjadi akibat pengaruh tegangan-regangan akibat adanya ekspansi termal. Besarnya tegangan sisa dapat dihitung melalui besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan hukum Hooke.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (2.19)$$

Dimana,

$$\{\sigma\} = \text{vektor tegangan} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$$

$$[D] = \text{matrik kekakuan elastis atau matrik } stress-strain$$

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon - \varepsilon^{th}\} = \text{vektor regangan elastis}$$

$$\{\varepsilon\} = \text{vektor regangan total} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}]^T$$

$$\{\varepsilon^{th}\} = \text{vektor regangan termal}$$

Persamaan (3.19) dapat dijabarkan menjadi,

$$\{\varepsilon^{th}\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (2.20)$$

Untuk kasus tegangan sisa pada model 3-dimensi, maka pada persamaan regangan termal dapat diubah menjadi,

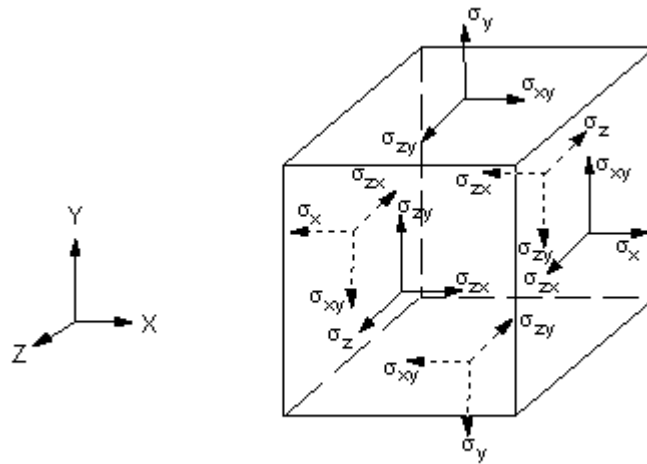
$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2.21)$$

Dimana,

α_x = koefisien ekspansi termal arah sumbu-x

ΔT = perbedaan temperatur yang ditinjau dengan temperatur referensi

Vektor tegangan yang bekerja pada struktur dapat diilustrasikan pada Gambar 2.9,



Gambar 2. 9. Vektor tegangan

Matrik kekakuan $[D]^{-1}$ adalah,

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Dimana,

E_x = modulus elastisitas arah x

ν_{xy} = mayor *poisson ratio*

ν_{yx} = minor *poisson ratio*

G_{xy} = modulus geser bidang x-y

Untuk material isotropik maka $E_x = E_y = E_z$ dan $\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz}$

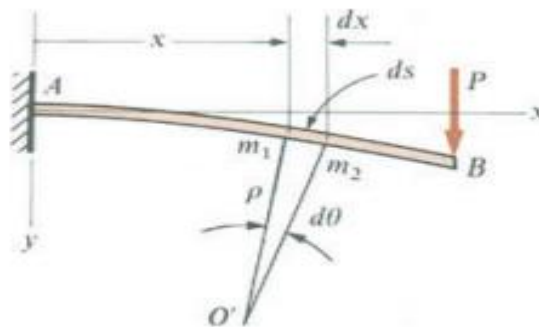
2.2.4 Analisis Local Buckling

Local buckling merupakan kondisi penekukan lokal yang terjadi pada daerah tertentu pada bagian struktur akibat beban kritis yang bekerja sehingga menyebabkan struktur berada pada kondisi tidak stabil. Berdasarkan ANSYS Help (2016) kriteria *buckling* terjadi ketika struktur mengalami deformasi yang cukup besar ketika diberikan beban kritis.

Pengecekan respon *buckling* suatu struktur dapat diketahui dari kapasitas dukungnya yang akan dijabarkan dalam sub-bab berikut,

2.2.4.1 Kurvatur Terhadap Bending

Tegangan dan regangan yang menyebabkan terjadinya defleksi pada pipa sehingga membentuk bengkokan seperti kurva disebut dengan kurvatur. Ilustrasi tentang kurvatur dapat dilihat pada Gambar (2.10)



Gambar 2. 10. Ilustrasi Local Buckling

Pada Gambar 2.10 menunjukkan sebuah *cantilever beam* yang diberi beban sebesar P pada ujung bebasnya. Dimana titik m1 dan m2 dijadikan acuan dalam analisa ini. Titik m1 memiliki jarak sejauh x terhadap sumbu-y, sedangkan titik m2 memiliki jarak yang kecil sebesar ds pada kurva beam. Pada tiap-tiap titik yang ditinjau dibuat garis normal terhadap titik O' yang mana titik itu disebut *Center of Curvature*. Sedangkan panjang garis normal O'm1 dan O'm2 disebut *radius of curvature* (ρ). Seperti pada ilmu kalkulus maka harga radius kurvatur adalah berkebalikan dengan kurvatur yakni,

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \quad (2.23)$$

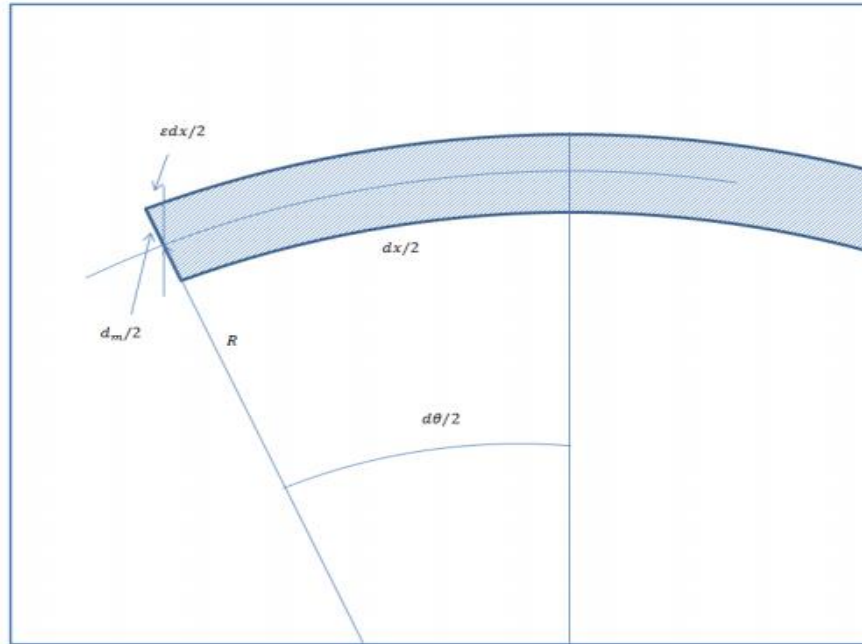
Dari Gambar 2.10 juga didapat persamaan sebagai berikut,

$$\rho d\theta = ds \quad (2.24)$$

Karena harga defleksi ($d\theta$) relatif kecil maka nilai ds dapat disamakan dengan dx . Sehingga diperoleh,

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad (2.25)$$

Apabila defleksi diperjelas pada Gambar 2.11, maka persamaan (2.25) dapat dikembangkan menjadi,



Gambar 2. 11. Penampang samping pipa

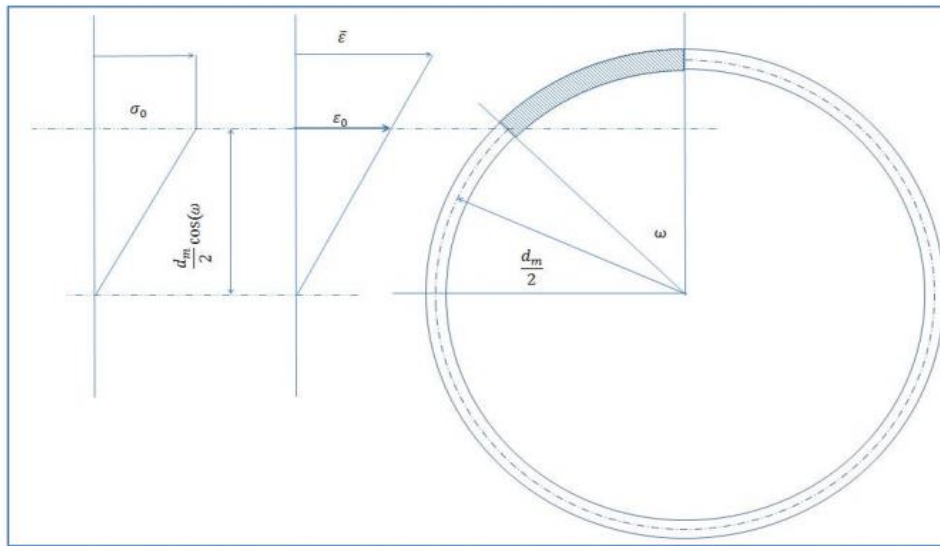
$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} = \frac{\varepsilon dx}{dm} \quad (2.26)$$

3.2.4.2 Hubungan Kurvatur dengan Momen Bending

Hubungan kurvatur dengan momen dilakukan untuk mengetahui kapasitas regangan suatu struktur sebelum terjadi *local buckling*. Maka dalam hal ini diperlukan karakteristik material berupa grafik tegangan dan regangan. Dalam hal ini material diasumsikan elasto-plastic atau non-linear. Pada saat pipa memiliki tingkah laku non-linear, maka pada saat terjadi *buckling*

terdapat momen bending yang menyebabkan terjadinya deformasi elastis dan plastis. Pada Gambar 2.12 mendeskripsikan potongan melintang pipa yang mengalami bending. Dimana sudut ω menyatakan sudut plastis penampang melintang pipa. Menurut Arthur (2003) momen bending tersebut dapat dihitung dengan menjumlahkan momen bending elastis dan plastis sesuai dengan persamaan berikut,

$$M = M_e + M_p = \int \sigma \cdot y \cdot dA + \int \sigma_0 \cdot y \cdot dA \quad (2.27)$$



Gambar 2. 12. Potongan melintang pipa

Pada persamaan (2.27) dapat dijabarkan sebagai berikut,

$$M = 4 \cdot \left(\overbrace{\int_0^\omega \sigma_0 \frac{d_m}{2} \cos(\varphi) t \frac{d_m}{2} d\varphi}^{\text{Elastic part}} + \overbrace{\int_\omega^{\frac{\pi}{2}} \sigma_0 \frac{\cos(\varphi)}{\cos(\omega)} \frac{d_m}{2} \cos(\varphi) t \frac{d_m}{2} d\varphi}^{\text{Plastic part}} \right) \quad (2.28)$$

Dengan menyelesaikan integral diatas, sudut plastis terhadap persamaan momen, maka dapat dihasilkan persaaamn sebagai berikut,

$$M = \sigma_o d_m^2 t \left(\sin(\omega) + \frac{1}{\cos(\omega)} \left(\frac{\pi}{2} - \omega - \cos(\omega) \sin(\omega) \right) \cdot \frac{1}{2} \right) \quad (2.29)$$

Dimana,

M_e = momen bending elastis

M_p = momen bending plastis

σ = tegangan bending

σ_o = tegangan bending saat yield point

y = sumbu netral

t = ketebalan

d_m = rata-rata diameter luar dan dalam pipa (m)

Pada saat terjadi momen luluh, tegangan di permukaan pipeline akan sama dengan tegangan luluh (*yield stress*). Maka momen luluh pada saat di titik luluh nilai dari ω masih 0, maka

$$M_o = \frac{\pi}{4} \sigma_o d_m^2 t \quad (2.30)$$

Deformasi plastis akibat momen bending akan terjadi apabila sudut ω telah mencapai titik luluh yakni $\omega = \frac{\pi}{2}$. Apabila harga tersebut disubstitusikan pada persamaan (2.27) maka didapatkan momen bending pada saat memasuki fase deformasi plastis adalah,

$$M_p = \sigma_o d_m^2 t \quad (2.31)$$

Pada saat terjad yield, berdasarkan hukum Hook harga stress yield adalah,

$$\varepsilon_o = \frac{\sigma_o}{d_m} \quad (2.32)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.26), (2.30), (2.31) dan (2.32) ke dalam persamaan (2.27) maka didapatkan persamaan,

$$\frac{M}{M_0} = \frac{4}{\pi} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^2} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right) - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \right) \quad (2.33)$$

Pada persamaan (2.33) diatas menunjukkan hubungan antara kurvatur dan momen bending pipa. Tingkah laku linear material akan terjadi ketika regangan (ε) yang terjadi kurang dari regangan yield (ε_0). Sedangkan perilaku non-linear akan terjadi ketika regangan yang terjadi melebihi regangan yield (ε_0). Pada persamaan (2.33) terlihat cukup rumit untuk menggambarkan keterkaitan antara kurvatur dengan momen, maka dari itu Ramberg-Osgood melakukan penyederhanaan terhadap hubungan kurvatur dan momen bending pada perilaku material non-linear dengan persamaan sebagai berikut (Offpipe-Asistent),

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^\beta \quad (2.34)$$

Atau,

$$\frac{\kappa}{\kappa_y} = \frac{M}{M_y} + A \left(\frac{M}{M_y} \right)^B \quad (2.35)$$

Dimana,

ε = regangan (m)

ε_y = regangan yield (m)

σ = tegangan (MPa)

σ_y = tegangan yield (MPa)

α & β = Konstanta Ramberg-Osgood Pada Tegangan-Regangan

K = kurvatur

κ_y = kurvatur yield

M = Bending momen

M_y = Bending yield momen

A & B = Konstanta Ramberg-Osgood Pada Momen-Curvature

2.2.4.3 Kriteria Buckling Berdasarkan DNV OS F 101

Beban kombinasi yang bekerja pada pipa pada saat kondisi operasi dapat berupa beban momen, aksial, dan tekanan eksternal. Adanya pengaruh kombinasi beban tersebut dapat menyebabkan terjadinya *local buckling*. Berdasarkan DNV OS F 101 menyatakan bahwa tingkat keamanan agar pipa tidak mengalami *Local Buckling* sesuai persamaan 2.36,

$$\left(\gamma_{SC} \gamma_m \left(\frac{M_d}{\alpha_c M_p} \right) + \gamma_{SC} \gamma_m \left(\frac{S_d}{\alpha_c S_p} \right)^2 \right)^2 + \left(\gamma_{SC} \gamma_m \left(\frac{p_e}{p_c} \right) \right)^2 \leq 1 \quad (2.36)$$

Dimana,

γ_{SC} = safety class resistance factors
(normal = 1,138)

γ_m = material resistance factor
(SLS=1,15)

M_d = Desain bending momen

M_p = Momen plastis

S_c = Design effective axial force

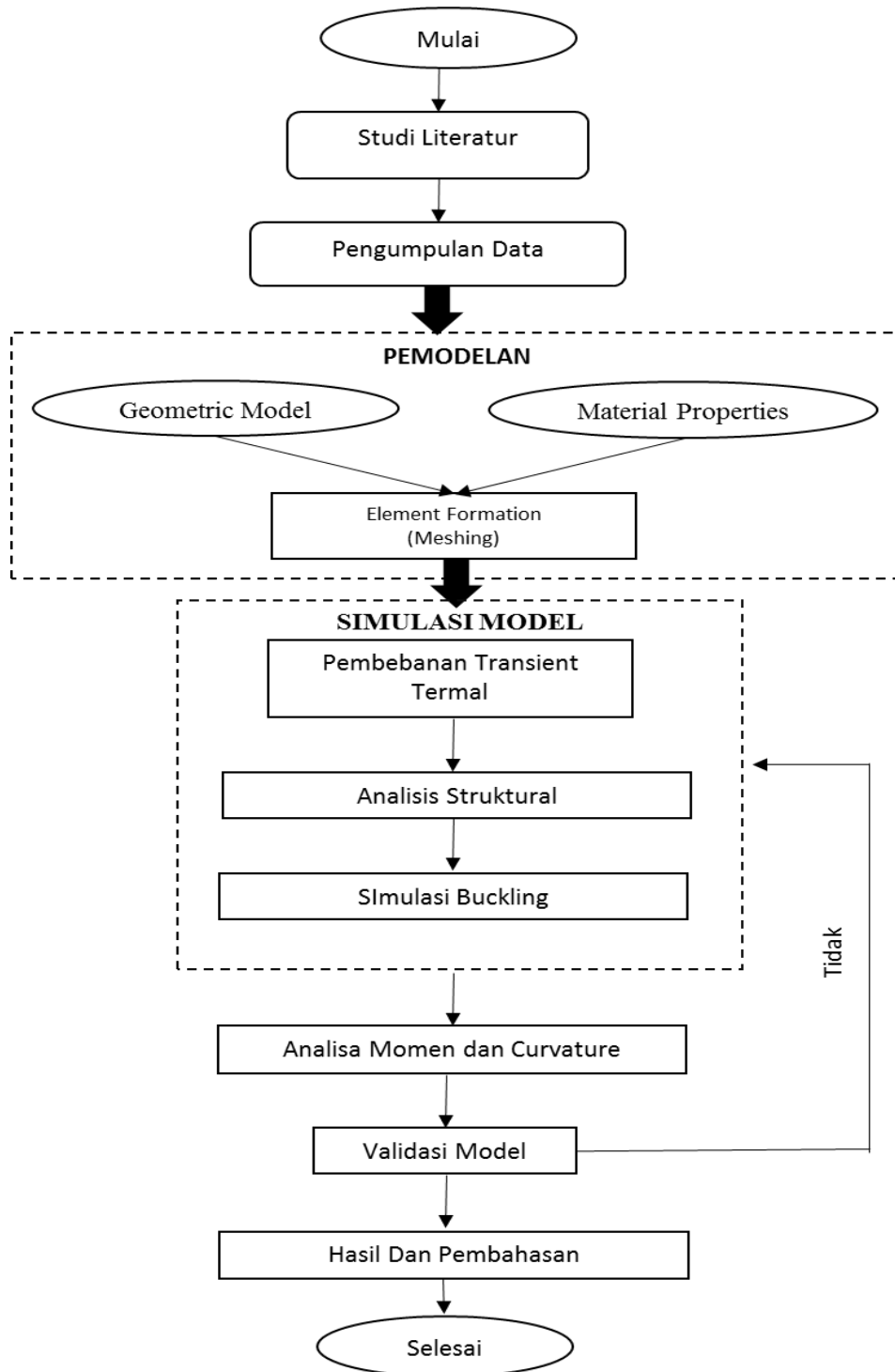
P_e = eksternal pressure design

α_c = *flow stress parameter accounting for strain hardening*
=1,2

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian

3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian

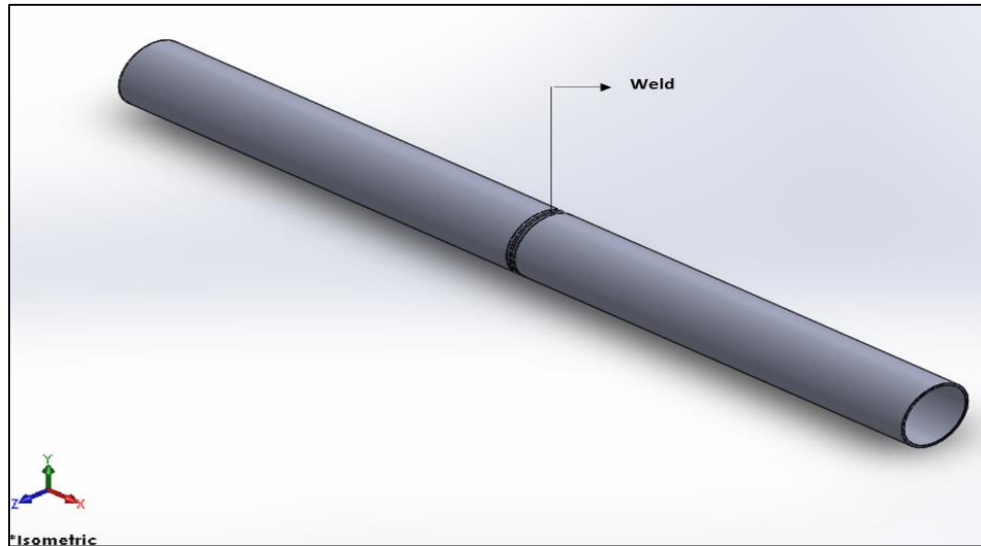
3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi dari penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan analisa tegangan sisa pada pengelasan pipa bawah laut. Sumber yang dijadikan referensi adalah jurnal, tugas akhir, tesis, dan buku pendukung yang berkaitan.

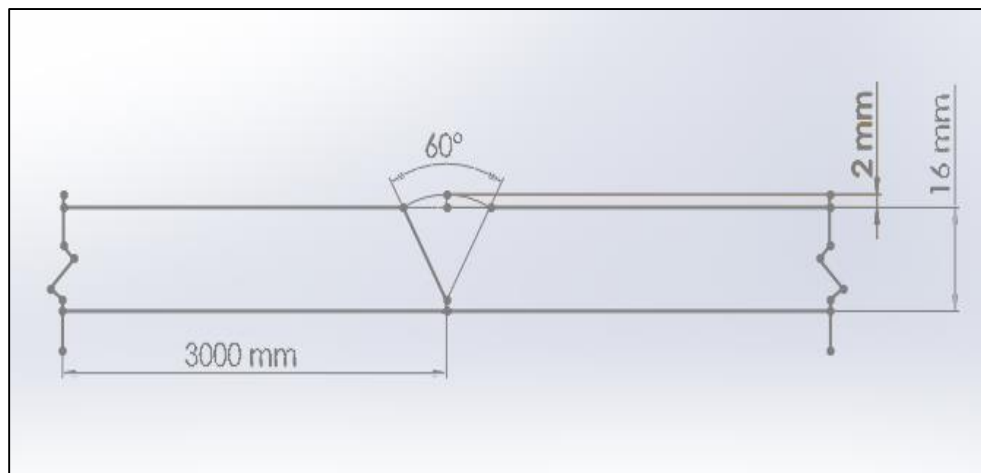
3.2.2 Pengumpulan Data

3.2.2.1 Geometri Pipeline

Geometri pipa yang digunakan sesuai dengan Gambar 3.2 dan 3.3 dengan spesifikasi model pada Tabel 3.1



Gambar 3. 2. Geometri Pipeline



Gambar 3. 3. Butt-weld pengelasan

Tabel 3. 1. Spesifikasi model pipeline

Material		
AISI 304		
	Type	
API 5L Grade B		
Dimensi	Nilai	Satuan
Diameter	508	mm
Ketebalan	16	mm
Panjang Spesimen	3000	mm

3.2.2.2 Material Properties

Material pipa yang digunakan mengacu pada AISI 304 untuk *Stainless Steel*. Dimana sifat-sifat material untuk setiap terjadinya perubahan suhu adalah pada Tabel 3.2 berikut,

Tabel 3. 2. Data material properties berdasarkan perubahan temperatur

Temperature (°C)	Specific heat (J/g °C)	Conductivity (J/mm °C s)	Density (g/mm ³)	Yield stress (MPa)	Thermal expansion coefficient (°C ⁻¹)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
0.000	0.462	0.0146	0.790	265.00	1.70e-5	198.50	0.294
100.00	0.496	0.0151	0.788	218.00	1.74e-5	193.00	0.295
200.00	0.512	0.0161	0.783	186.00	1.80e-5	185.00	0.301
300.00	0.525	0.0179	0.779	170.00	1.86e-5	176.00	0.310
400.00	0.540	0.0180	0.775	155.00	1.91e-5	167.00	0.318
600.00	0.577	0.0208	0.766	149.00	1.96e-5	159.00	0.326
800.00	0.604	0.0239	0.756	91.00	2.02e-5	151.00	0.333
1200.0	0.676	0.0322	0.737	25.000	2.07e-5	60.00	0.339
1300.0	0.692	0.0337	0.732	21.000	2.11e-5	20.000	0.342
1500.0	0.700	0.120	0.732	10.00	2.16e-5	10.000	0.388

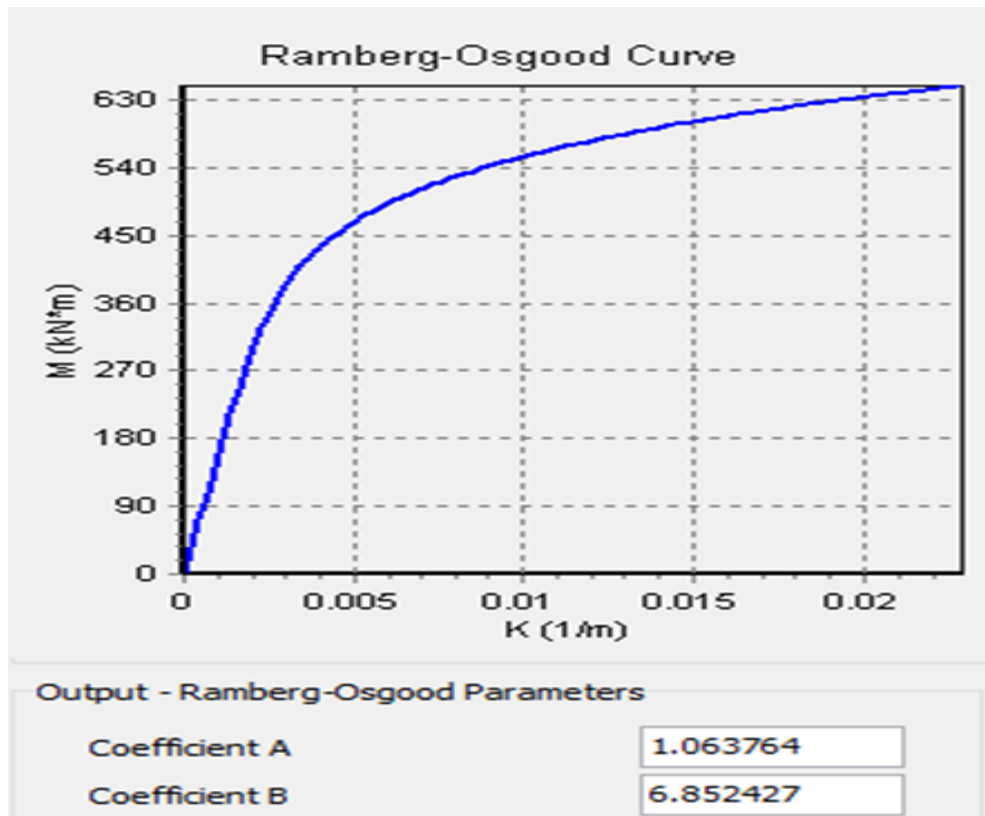
3.2.2.3 Data Pengelasan

Data pengelasan yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

Proses : Single Pass SMAW elektroda tunggal
 Jenis Pengelasan : Butt Weld
 Arus : 140 A
 Voltase : 30 Volt
 Travel Speed : 3 mm/s
 Diameter Elektroda : 4 mm

3.2.2.4 Kurva Moment-curvature

Data kurva moment-curvature dapat diperoleh dari software asistant OFFPIPE untuk jenis pipa API 5L Grade B sesuai pada Gambar 3.4,



Gambar 3. 4. Ramberg-Osgood Parameter

3.2.3 Pemodelan

Pemodelan yang dilakukan pada tahap ini disebut Preprocessor, yang mana pembuatan model geometri struktur beserta material propertinya. Selain itu, sebelum dilakukan simulasi geometri dari struktur perlu dilakukan pendiskritan (meshing) elemen. Detail penjelasan tentang pemodelan akan dijelaskan lebih dalam pada sub-bab 3.2.3.

3.2.4 Simulasi Model

Pada simulasi model terdapat tiga analisa yang dilakukan pada geometri pipa. Berikut ini merupakan simulasi yang akan di analisa,

a. Analisa Termal

Tahap ini dilakukan untuk mengakomodasi proses pengelasan melintang pipa. Beban termal berdasarkan penambahan waktu (*time incremental*) berupa konduksi dan konveksi diaplikasikan pada tahap ini.

b. Analisa Mekanis

Output pada analisa termal dijadikan input pada analisa ini. Dalam analisa ini dilakukan transformasi elemen dari solid 70 (thermal elemen) ke elemen solid 185. Tujuan dilakukan analisa ini adalah untuk menentukan besarnya distribusi tegangan yang terjadi pada pipa akibat pengaruh pengelasan.

c. Analisa Buckling

Setelah analisa mekanis dilakukan, tahap selanjutnya adalah analisa buckling. Dalam analisa ini, geometri pipa diberikan beban momen secara *transient* hingga pipa mengalami buckling. Keluaran dari analisa ini berupa kurva momen-kurvatur.

3.2.5 Analisa Momen dan Kurvatur

Grafik momen-kurvatur diperoleh dari persamaan Ramberg-Osgood yang diterangkan pada persamaan 2.34 dan 2.35.

3.2.6 Validasi Model

Pada tahap ini dilakukan validasi pada penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Acuan dari validasi yakni grafik histori temperature dan tegangan sisa.

3.2.7 Analisa dan Pembahasan

Pada tahap ini dilakukan interpretasi hasil dan pembahasan pada laporan tugas akhir.

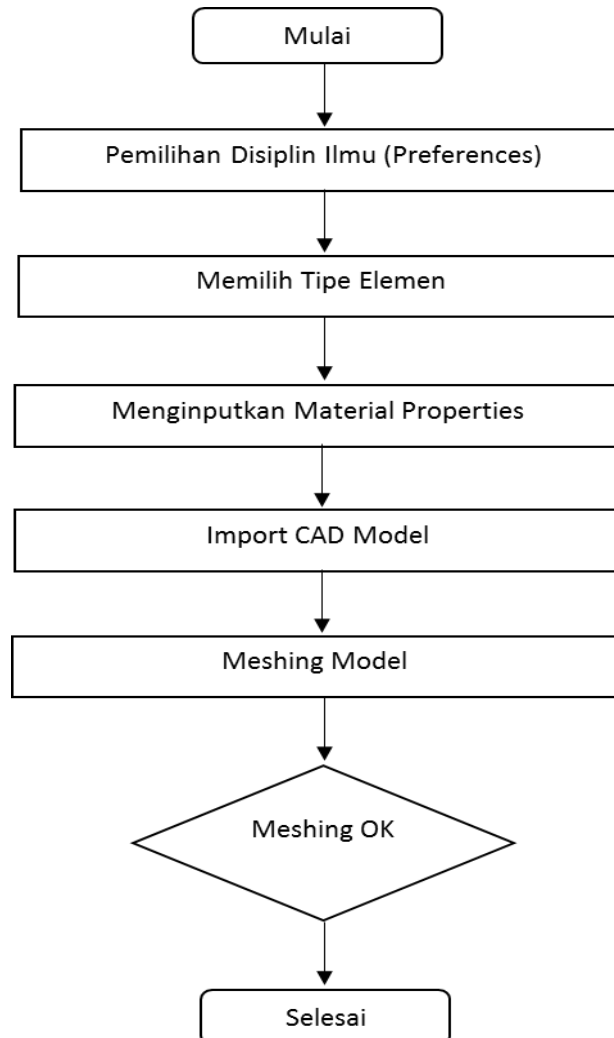
3.3 Deskripsi Pemodelan dan Simulasi

3.3.1 Pemodelan Geometri

Pada tahap ini dilakukan pemodelan 3-dimensi pipa disertai pemodelan kampuh pengelasannya.

3.3.1.1 Diagram Alir Pemodelan Geometri

Tahapan dalam pemodelan geometri dijelaskan dalam Gambar 3.5,



Gambar 3. 5. Diagram alir pemodelan geometri

3.3.1.2 Memilih disiplin ilmu

Disiplin ilmu yang dipilih pada pemodelan ini adalah *thermal* dan *structural*. Dimana pemilihan *thermal* ditujukan untuk simulasi pengelasan dan pemilihan *structural* ditujukan untuk simulasi mekanis pada tegangan sisa dan *local buckling*.

3.3.1.3 Memilih Tipe Elemen

Seperti yang dijelaskan pada sub-bab 2.2.3.1 a pada pemilihan jenis elemen yang disesuaikan dengan jenis analisa yang dilakukan. Pada analisa *thermal*

jenis elemen yang dipilih yakni, solid 90 dan Analisa *structural* digunakan elemen solid 186.

3.3.1.4 Menginputkan Material Properties

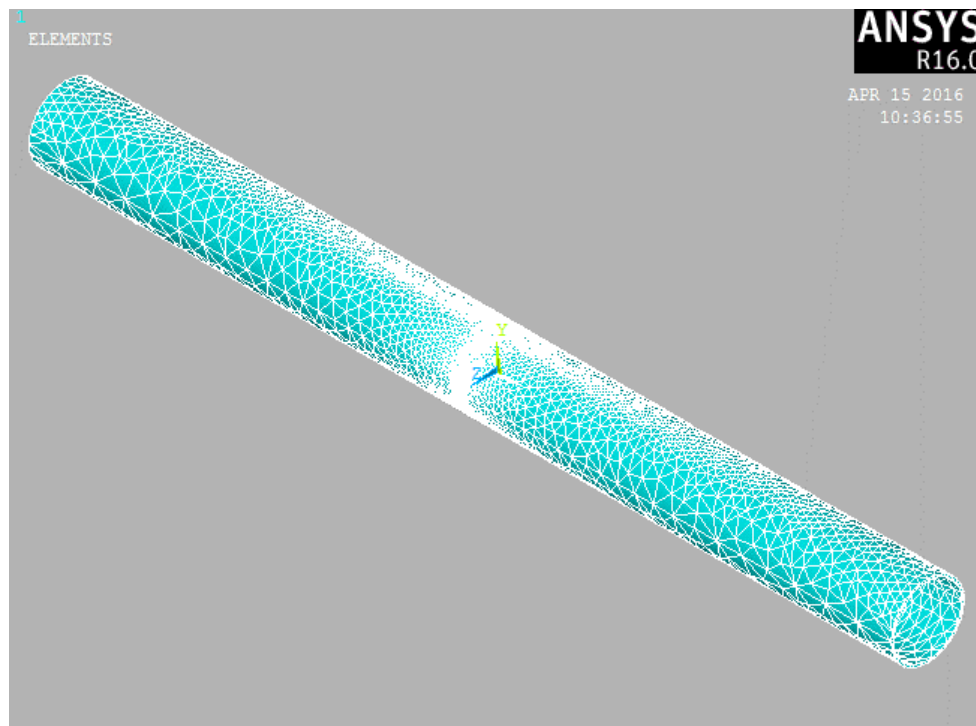
Sifat-sifat properti material setiap terjadinya perubahan temperatur diinputkan pada tahap ini. Data properti material yang digunakan sesuai pada Tabel 3.2.

3.3.1.5 Import CAD Model

Pada pemodelan bentuk 3-dimensi dilakukan di software Solidwork 2014. Maka dari itu, data pemodela perlu diimportkan ke ANSY 16 dalam format IGES *file*.

3.3.1.6 Meshing Model

Meshing yang digunakan pada analisa ini adalah *meshing volume* dengan memodifikasi ukuran area model. Ukuran Meshing yang digunakan pada area model ditentukan berdasarkan daerah pada pengelasan. Sehingga dalam analisa ini akan dilakukan pembagian ukuran *meshing* pada tiga daerah yakni, *weldment*, HAZ, dan *base metal* seperti pada Gambar 3.6.



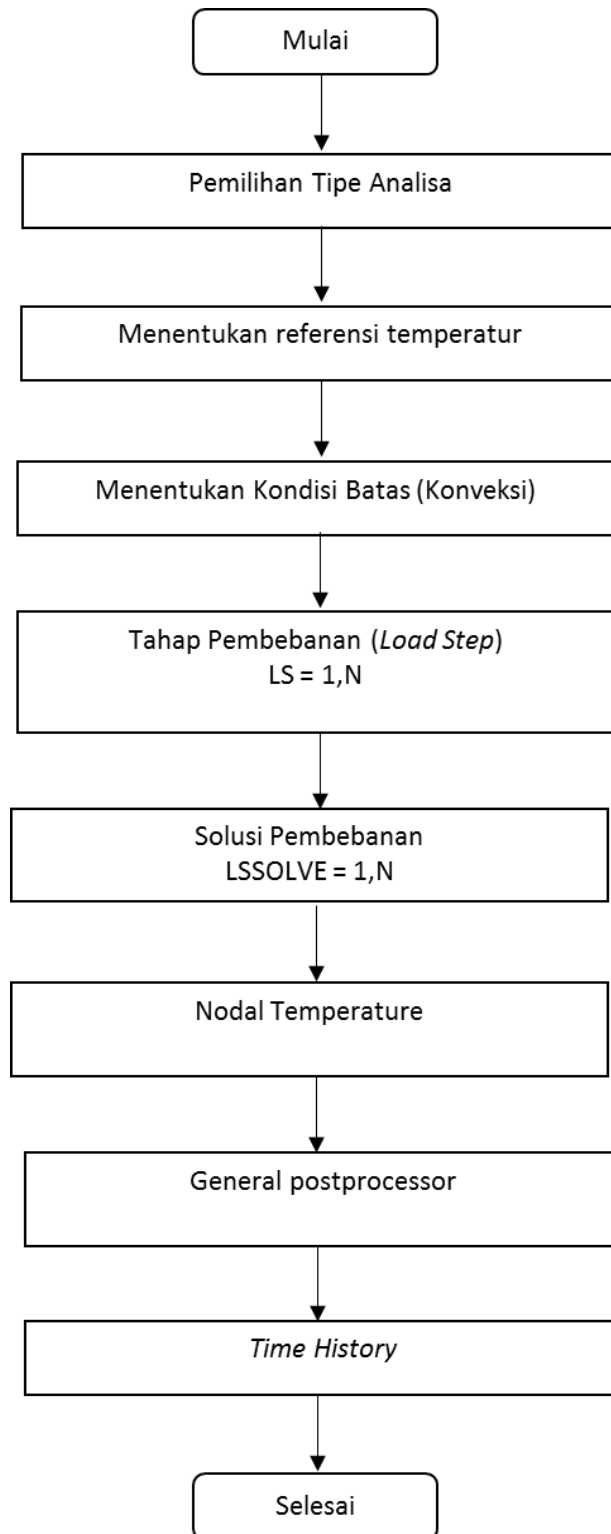
Gambar 3. 6. Hasil meshing model

3.3.1.7 Pengecekan Meshing

Hasil meshing dicek tiap elemen dan titik simpulnya, rasio ukuran elemen, dan konektivitas antar titik simpul. Pengecekan dilakukan dengan melakukan sensitifitas meshing yang melibatkan pemilihan ukuran elemen secara iteratif hingga didapatkan hasil yang konstan.

3.3.2 Simulasi Pengelasan

Pada tahap ini, dilakukan simulasi pengelasan pipa dengan alur pengerjaan sesuai Gambar 3.7,



Gambar 3. 7. Diagram alir simulasi pengelasan

3.3.2.1 Pemilihan Tipe Analisa

Dalam penelitian ini jenis analisa yang dipilih adalah transient termal dan transient statis. Analisa transient dipilih karena pembebanan pengelasan yang diberikan berubah terhadap fungsi waktu.

3.3.2.2 Menentukan Referensi dan Uniform Temperatur

Referensi dan uniform temperatur yang digunakan pada saat pengelasan disesuaikan dengan kondisi suhu ruangan yakni 25° C atau 298° K.

3.3.2.3 Menentukan Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan pada proses pengelasan adalah perbedaan aliran konveksi pada material.

3.3.2.4 Tahap Pembebanan

Pada tahap ini, pembebanan pengelasan diberikan pada area pengelasan. Beban yang diberikan adalah heat flux yang diaplikasikan pada permukaan daerah lasan. Pada setiap pembebanan yang telah diaplikasikan diberikan label waktu dan nomor pembebanan (*Load Step*) hingga semua permukaan luasan lasan.

3.3.2.5 Solusi Pembebanan

Ketika semua beban konveksi dan *heat flux* telah diaplikasikan. Maka tahap selanjutnya yang perlu dilakukan adalah melakukan penyelesaian dari step awal pembebanan hingga akhir pembebanan.

3.3.2.6 Nodal Temperature

Pada tahap ini dilakukan pengecekan temperatur pengelasan pada tiap-tiap load step sebagai bentuk validasi kondisi suhu pengelasan.

3.3.2.7 General Postproc

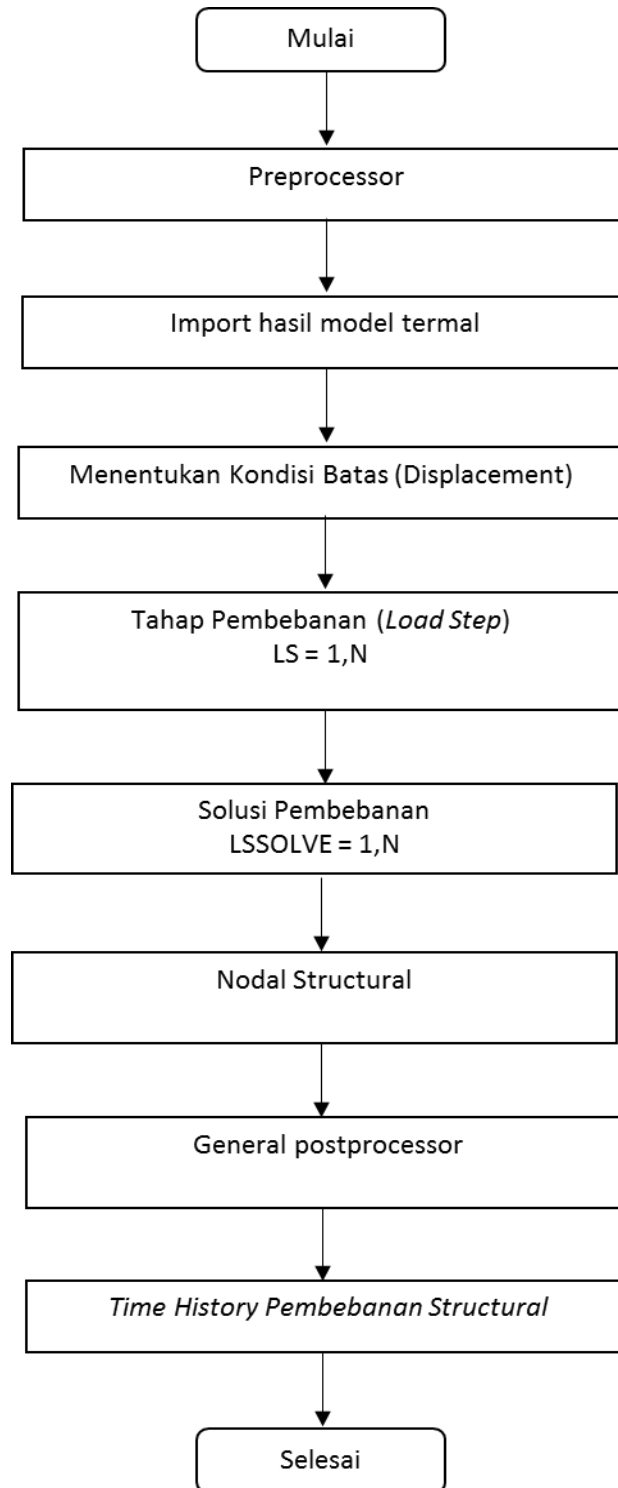
Dilakukan untuk melakukan plot temperatur pada beberapa node di daerah pengelasan.

3.3.2.8 Time History

Penentuan distribusi temperatur pada setiap perubahan waktu pada proses pengelasan.

3.3.3 Simulasi Tegangan Sisa

Pada tahap ini, dilakukan simulasi tegangan sisa dengan alur pengerjaan sesuai Gambar 3.8,



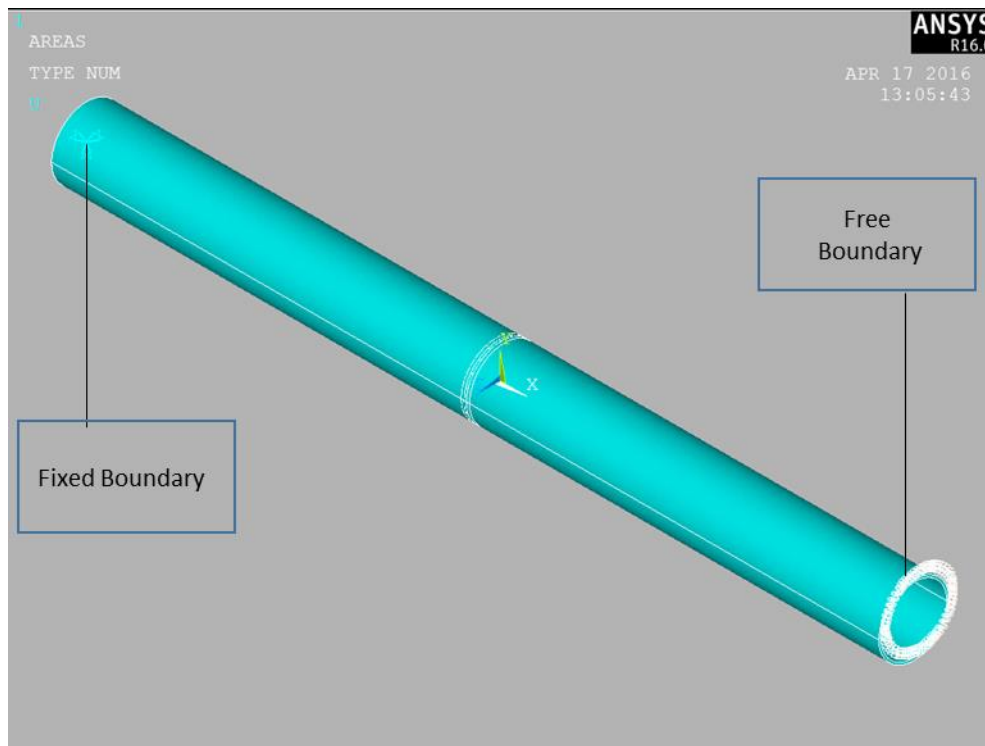
Gambar 3. 8. Diagram simulasi tegangan sisa

3.3.3.1 Preprocessor

Tahap ini merupakan tahap persiapan sebelum melakukan simulasi struktural. Dalam hal ini model dan beban termal pada analisa sebelumnya di import untuk dijadikan sebagai *initial load*. Namun pada analisa struktural perlu dilakukan perubahan jenis elemen terlebih dahulu dari elemen termal ke struktural. Selanjutnya perlu dilakukan import model termal yang mana jenis file yang diimportkan memiliki format *file.rth*.

3.3.3.2 Menentukan Kondisi Batas

Pada kondisi batas yang diaplikasikan pada analisa struktural adalah dengan memberikan tumpuan (*fixity*) pada model. Jenis tumpuan yang digunakan adalah jepit (*fixed*) dan bebas (*free*) yang diaplikasikan pada area kedua ujung pipa seperti pada Gambar 3.9



Gambar 3. 9. Kondisi batas model

3.3.3.3 Tahap Pembebanan Struktural

Pada tahap ini dilakukan pembacaan hasil beban dari simulasi termal pada tiap-tiap Load Step pembebanan. Pada setiap pembebanan yang telah diaplikasikan diberikan label waktu dan nomor pembebanan hingga semua permukaan luasan lasan.

3.3.3.4 Solusi Pembebanan Struktural

Ketika semua Load Step pada pembebanan struktural telah diinputkan tahap selanjutnya adalah melakukan solusi (*solve*).

3.3.2.5 Nodal Struktural

Pada tahap ini dilakukan pengecekan tegangan sisa pengelasan pada tiap-tiap load step sebagai bentuk validasi kondisi pengelasan pada penelitian lain.

3.3.2.6 General Postproc

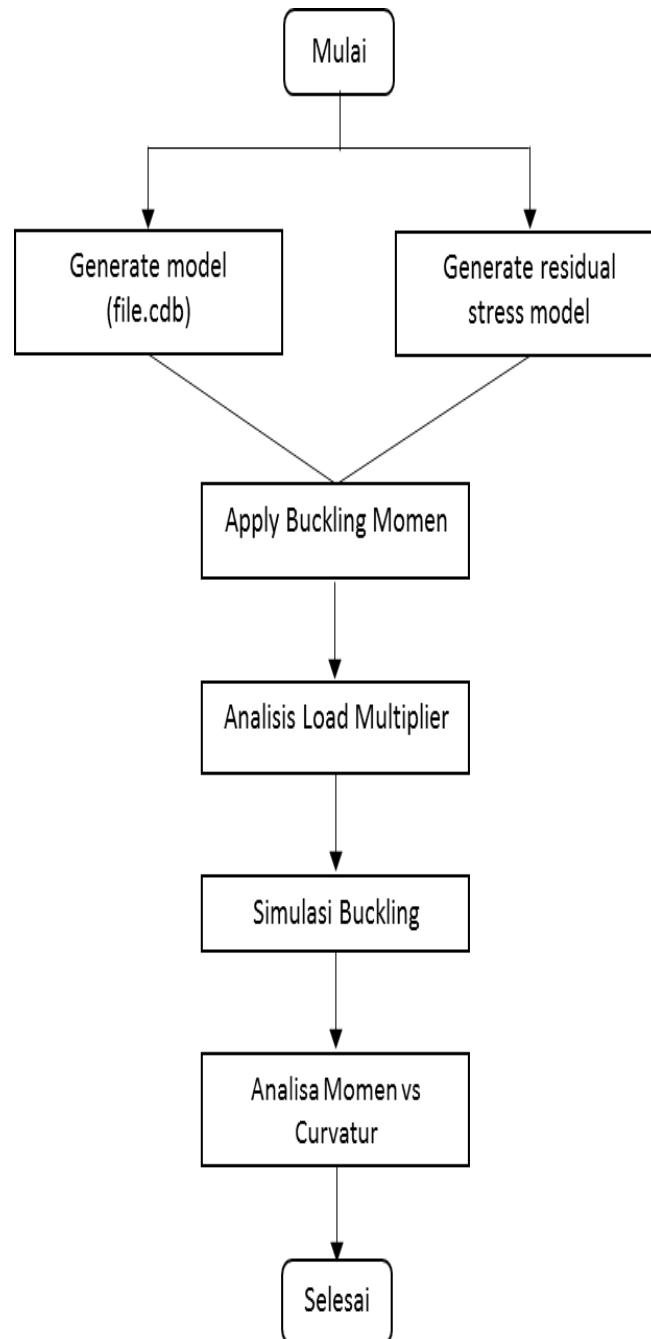
Dilakukan untuk melakukan plot tegangan sisa pada beberapa node di daerah pengelasan.

3.3.2.7 Time History

Penentuan distribusi tegangan sisa pada setiap perubahan waktu pada proses pengelasan.

3.3.4 Simulasi *Local Buckling*

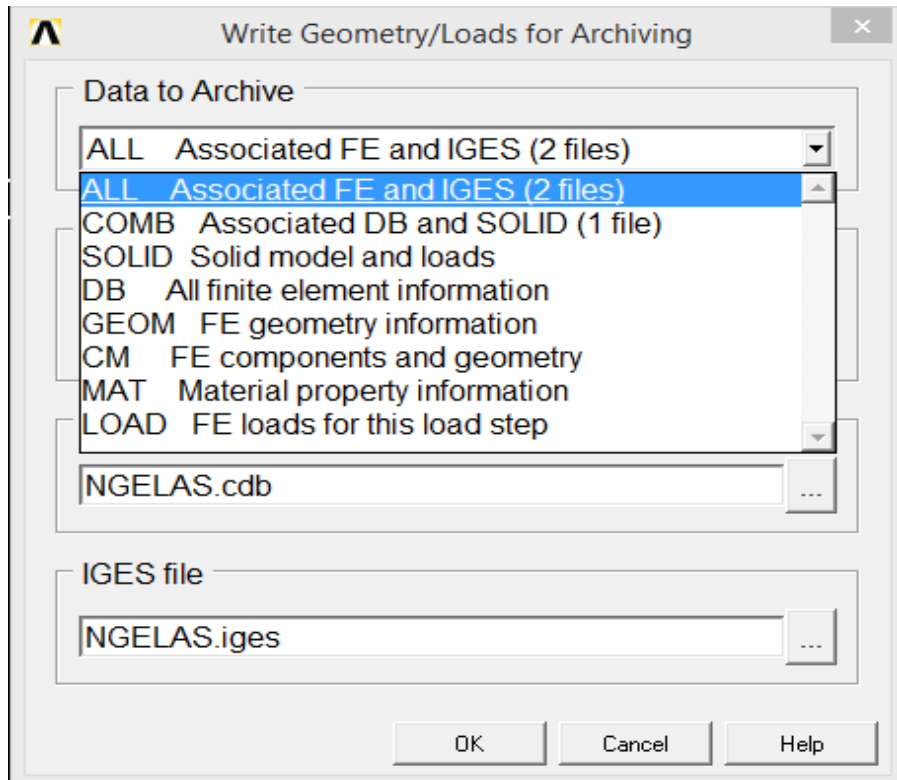
Berikut ini merupakan alur dalam melakukan simulasi *Local Buckling* pada Gambar 3.10,



Gambar 3. 10. Standart alur simulasi *Local Buckling*

3.3.4.1 Generate Model dan Residual Stress Model

Tahap awal sebelum melakukan analisa *local buckling* adalah mengimport model, material properties, dan residual stress-strain yang telah diperoleh dari hasil *output* simulasi tegangan sisa. Dalam hal ini, untuk model struktur pipa dikonversikan kedalam format file.cdb sesuai pada Gambar 3.11. Dimana file tersebut memuat informasi berupa model beserta material properties pipa.

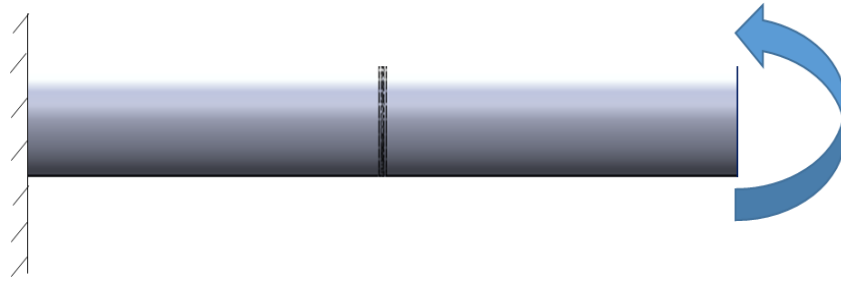


Gambar 3. 11. Import model

Pada Gambar 3.11 pilih DB untuk mengimport model dan pilih MAT untuk mengimport material properties. Sedangkan untuk data residual stress dan strain diperoleh dengan manginputkan command “INISTATE” sesuai pada Lampiran A4 pada saat sebelum dilakukan running struktural.

3.3.4.2 Apply Buckling Momen

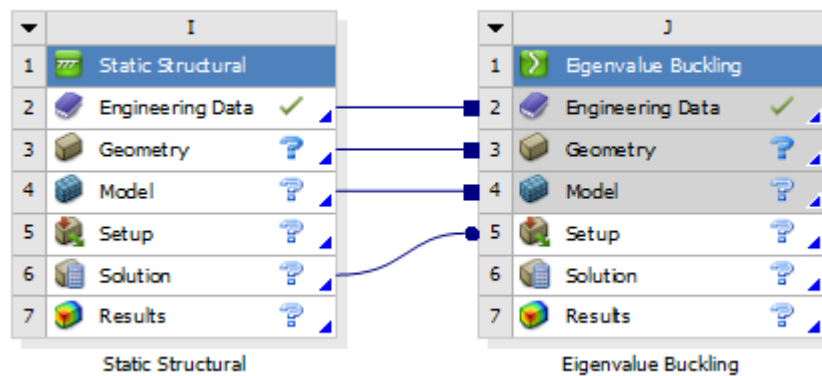
Penentuan buckling momen diaplikasikan pada salah satu ujung model pipa dengan besaran yang diberikan berupa 1 N.m sesuai pada Gambar 3.12. Penerapan beban ini pada model digunakan untuk mengetahui besarnya load multiplier (faktor pengali) yang menentukan besarnya beban kritis.



Gambar 3. 12. simulasi Local Buckling

3.3.4.3 Analisis Load Multiplier

Pada analisa ini dilakukan simulasi buckling untuk didapatkan faktor pengali (load multiplier) dengan besaran tertentu. Dimana besarnya faktor pengali tersebut merupakan nilai kritis beban yang menyebabkan struktur mengalami buckling. Maka dalam simulasi ini digunakan module analisa buckling untuk mendapatkan harga dari faktor pengali tersebut seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13. Module analisa buckling

3.3.4.4 Simulasi Buckling

Pada simulasi buckling, harga momen yakni 1 kN dikalikan dengan faktor pengali yang telah diperoleh dari analisa sebelumnya. Sehingga beban momen yang diaplikasikan pada simulasi ini merupakan harga momen kritis yang menyebabkan struktur mengalami buckling.

3.3.4.5 Analisa Momen Vs Kurvatur

Hasil simulasi buckling dapat di plot dalam bentuk grafik untuk mengecek kekuatan buckling pipa hingga struktur mengalami buckling.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Heat Flux

Sumber panas pengelasan yang dibebankan dalam struktur model pipa yakni berupa beban panas per area (*Heat Flux*). Perhitungan besarnya beban heat flux yang diaplikasikan pada area model dapat dihitung dengan persamaan 2.3 yakni,

$$\begin{aligned} Q &= 0.7 \times 120 \times 20 \\ &= 1680 \text{ watt} \end{aligned}$$

Besarnya area heat flux yang dihasilkan oleh elektroda dapat dihitung dengan persamaan,

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{1}{4} \pi d^2 \\ &= 12,566 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Sehingga heat flux yang dihasilkan oleh elektroda dapat dihitung dengan persamaan 2.5 yakni,

$$q_e = \frac{1680}{12,566} = 133,69 \text{ Watt/mm}^2$$

Luasan area pembebanan pada elemen (Al) dapat ditentukan dengan mengukur luasan elemen yang terbentuk pada hasil meshing. Dari hasil analisa diperoleh bahwa luasan elemen yang dibebani heat flux adalah

$$\begin{aligned} A_l &= p \times l \\ &= 39,029 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Besarnya area pengelasan yang dibebani heat flux pada setiap load step dapat dihitung dengan persamaan 2.6, yakni

$$\begin{aligned} A_f &= 16.63 \times 3 \times 26,599 \\ &= 1327,02 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, besarnya beban heat flux yang diberikan pada setiap area pengelasan pada setiap load step pembebanan dapat dihitung dengan persamaan 2.4 yakni,

$$q_l = 1680 \times \frac{39,029}{12,566}$$

$$= 3,932 \text{ Watt/mm}^2$$

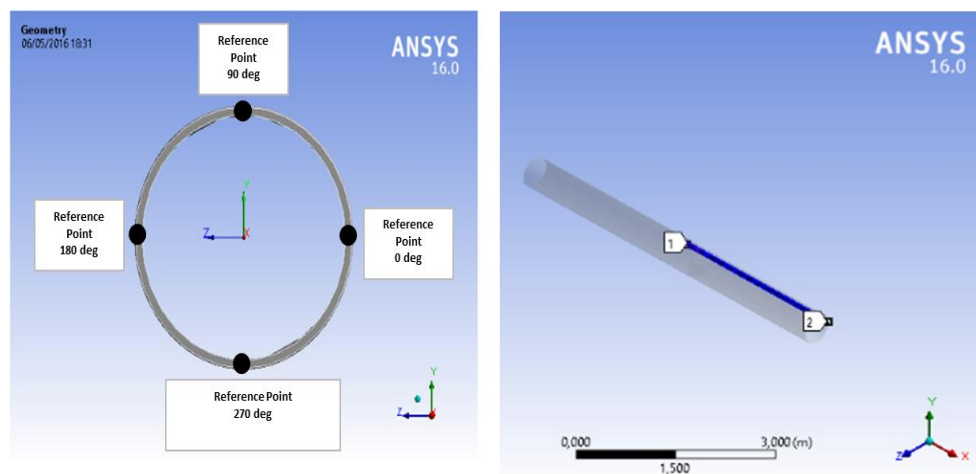
$$= 3.932 \times 10^6 \text{ Watt/m}^2$$

4.2 Analisa Geometri

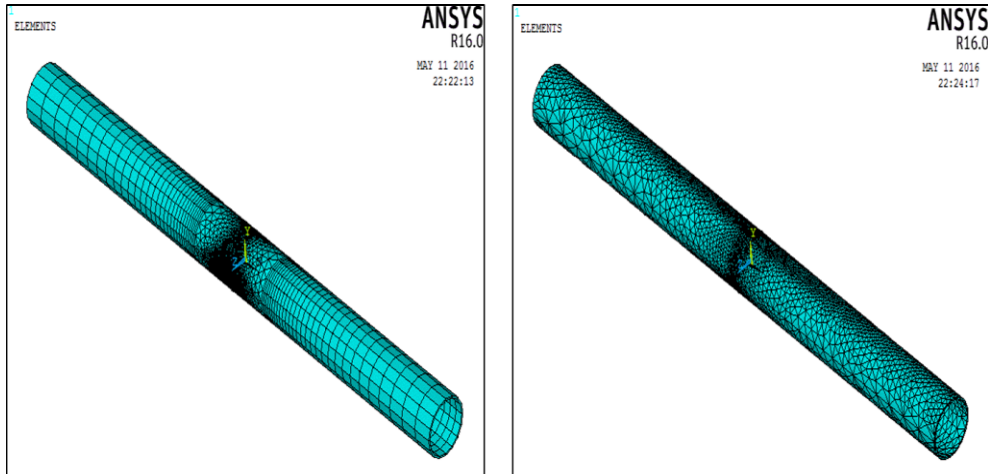
Dalam melakukan analisa geometri, hal yang signifikan untuk diperhatikan adalah pemodelan dari bentuk meshing yang digunakan. Pemilihan bentuk meshing yang tepat akan mempengaruhi beberapa aspek seperti, hasil output, waktu simulasi, jumlah elemen, dll. Itu mengapa dalam sub-bab ini perlu dibahas pemilihan bentuk meshing yang digunakan beserta akurasi ukuran yang tepat.

4.2.1. Pemilihan Bentuk Elemen Meshing

Pada simulasi ini akan dibandingkan dua jenis elemen meshing yang akan digunakan, yakni hexahedral (elemen brick) dan tetrahedral (elemen prisma) sesuai Gambar 4.2. Dalam membandingkan elemen tersebut terdapat beberapa variabel kontrol yang dibuat sama yakni, ukuran elemen, pembebanan, dan referensi tinjauan. Referensi tinjauan yang dilakukan terletak pada sudut 0° dengan arah memanjang dari *weld centerline* hingga ke ujung pipa sesuai pada *path line* Gambar 4.1 berikut,



Gambar 4. 1. Titik referensi peninjauan (kiri) dan isometric plane (kanan)



Gambar 4. 2. elemen hexahedral (kiri) dan elemen tetrahedral (kanan)

Pada Tabel berikut ini adalah hasil perbandingan antara kedua jenis elemen yang digunakan yakni,

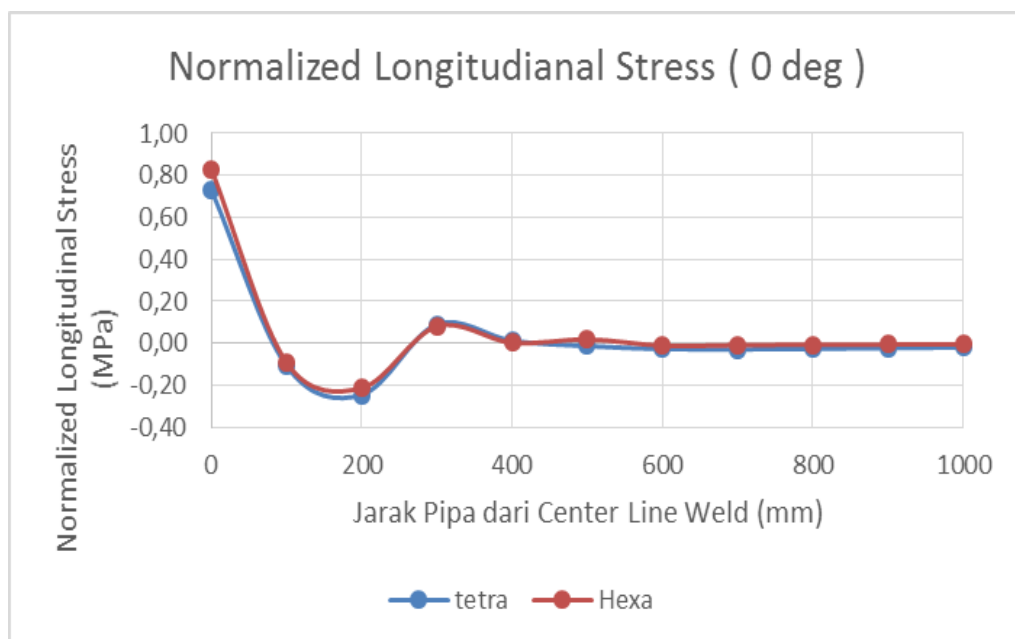
Tabel 4. 1. Tabel perbandingan elemen tetrahedral dan hexahedral

Pembandingan	Elemen Tetrahedral	Elemen Hexahedral
Jumlah Elemen	16649	11707
Jumlah Node	34763	24535
Temperatur Maksimum (°C)	2008	1975
Waktu Running (Jam)	18	15
Total Memori Disk (Gb)	4,8	3,3
Tegangan Sisa Longitudinal 0 deg (MPa)	194	220
Tegangan Sisa Tangensial 0 deg (MPa)	222	246

Dari Tabel 4.1 menunjukkan bahwa elemen *hexahedral* memiliki jumlah elemen dan node yang lebih sedikit dibandingkan dengan elemen *tetrahedral*, sehingga hal ini akan berpengaruh pada waktu simulasi yang dilakukan. Dapat diketahui bahwa elemen hexahedral memiliki waktu *solving* 3 jam lebih singkat apabila dibandingkan dengan elemen *tetrahedral*.

Sedangkan untuk perbandingan hasil distribusi tegangan sisa disepanjang pipa secara longitudinal dapat dideskripsikan pada Gambar 4.3.

Pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa hasil tegangan sisa yang dihasilkan memiliki karakteristik yang hampir serupa. Sehingga dapat diketahui bahwa penggunaan elemen *hexahedral* jauh menguntungkan karena dengan waktu *solving* yang lebih singkat, dihasilkan distribusi tegangan sisa yang tidak jauh berbeda dari elemen *tetrahedral*. Sehingga untuk analisa selanjutnya elemen yang digunakan adalah *hexahedral*.



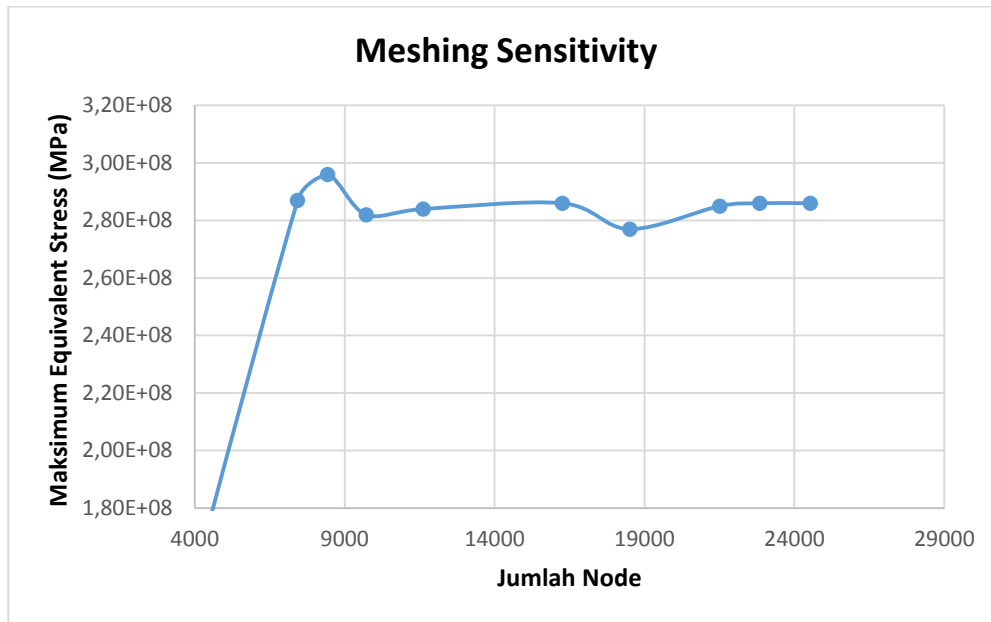
Gambar 4. 3. Distribusi tegangan sisa longitudinal

4.2.2. Sensitifitas Meshing

Sensitifitas meshing dilakukan untuk menentukan akurasi ukuran elemen. Hal ini dilakukan dengan melakukan perubahan ukuran elemen secara iteratif menjadi elemen lebih kecil hingga didapatkan hasil yang konstan.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa dengan penambahan jumlah node akan dihasilkan tegangan sisa yang semakin meningkat. Hal ini terjadi karena diskritisasi model dilakukan dengan jumlah elemen yang lebih banyak sehingga dihasilkan jumlah node yang berbanding lurus. Adanya peningkatan jumlah node ini akan berpengaruh pada jumlah *solving time*, akan tetapi hasil

yang diberikan akan mencapai titik kritis yakni dimana tegangan sisa yang terjadi tidak mengalami perubahan meskipun diberikan penambahan jumlah node. Pada Gambar 4.4 menunjukkan dengan jumlah node kisaran 24.000 harga maksimum equivalent stress tidak mengalami perubahan, sehingga dengan jumlah node demikian nilai tegangan sisa yang terjadi telah mencapai nilai kritis.



Gambar 4. 4. Sensitifitas meshing

4.3 Hasil Validasi

Pada penelitian ini divalidasikan dengan penelitian yang dilakukan oleh Al-Showaiter dkk (2015) dengan model pengelasan pipa yang sama namun berbeda pada *Welding Procedure Sequence* (WPS). Adapun hasil validasi tersebut adalah sebagai berikut,

4.3.1 Validasi Temperatur

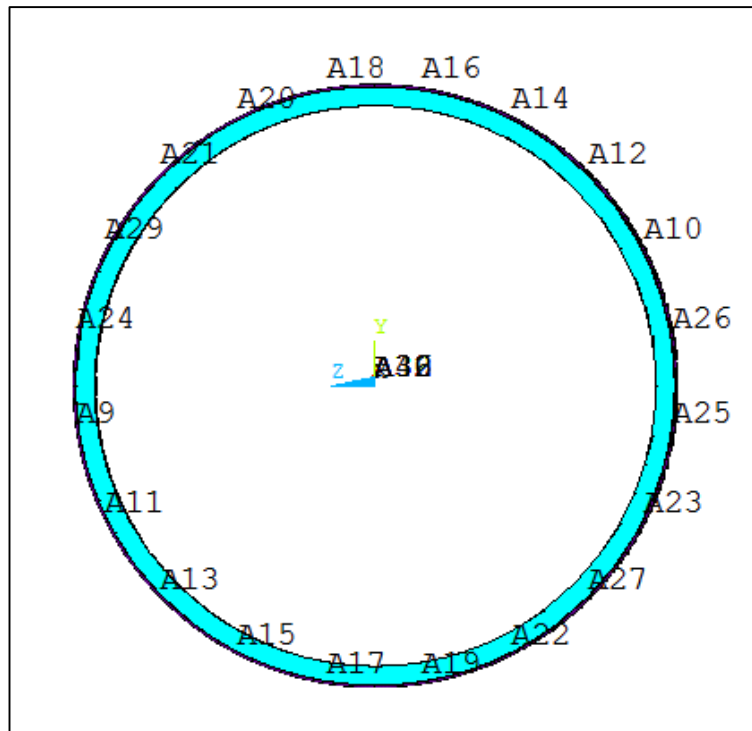
Validasi temperatur pada pengelasan pipa sesuai pada Gambar 4.6 yang menunjukkan historical temperatur pada load step 1 dengan penelitian Al-Showaiter dkk (2015). Dapat diketahui pada Gambar tersebut bahwa pada penelitian ini, jenis pengelasan yang digunakan menggunakan data WPS pengelasan dengan data arus dan tegangan yakni 120 A dan 20 V, Sedangkan pada penelitian oleh Al-Showaiter (2015) menggunakan data pengelasan yakni, 100 A dan 20 V. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pada penelitian

ini temperature puncak sebesar 1862 °C dan pada penelitian Al-Showaiter didapatkan temperature puncak sebesar 1360 °C. Perbedaan puncak temperature tersebut dipengaruhi oleh *input* arus dan tegangan yang digunakan sehingga akan memperbesar harga dari *heat flux*.

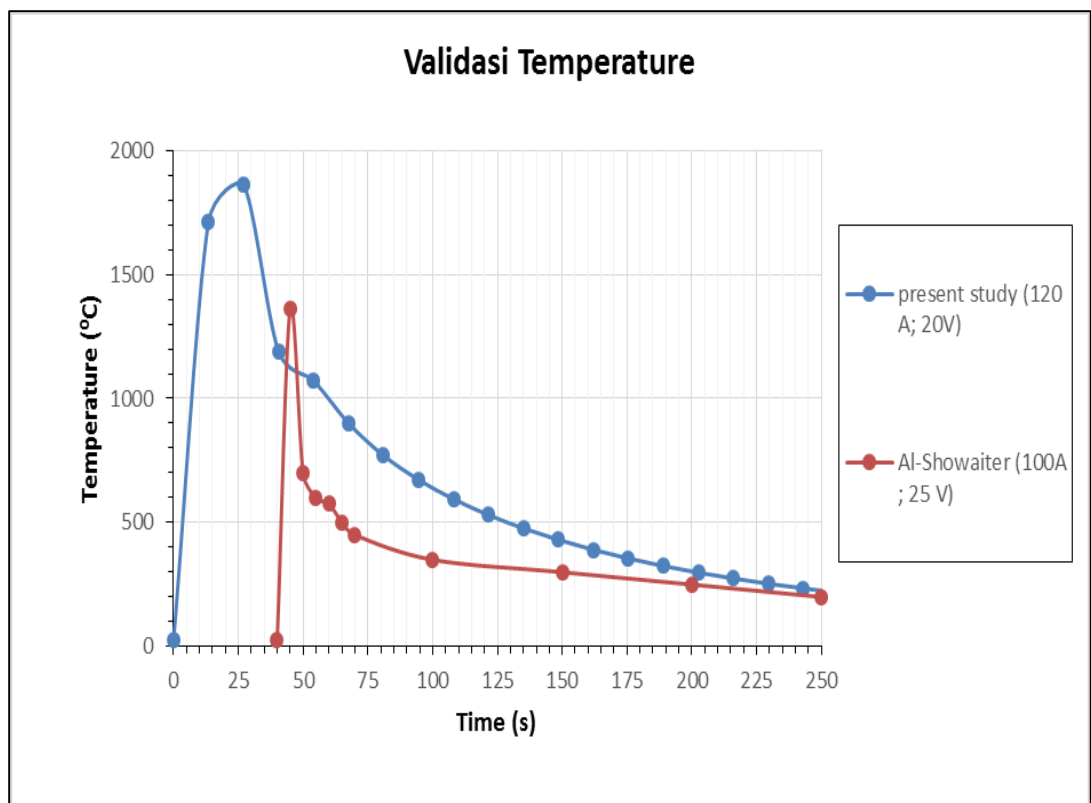
Pada Gambar 4.7 menunjukkan sejumlah historical temperatur pada beberapa node di daerah pengelasan. Pada simulasi termal tersebut dilakukan penambahan waktu (incremental time) sebesar 27 detik per load step yang dibebankan pada area pengelasan. Secara keseluruhan pembebanan termal pada tiap-tiap node terjadi secara merata dengan dibuktikan karakteristik grafik yang memiliki kontur serupa dan puncak suhu dengan kisaran 1900 °C.

Tabel 4. 2. Loadstep Pembebanan

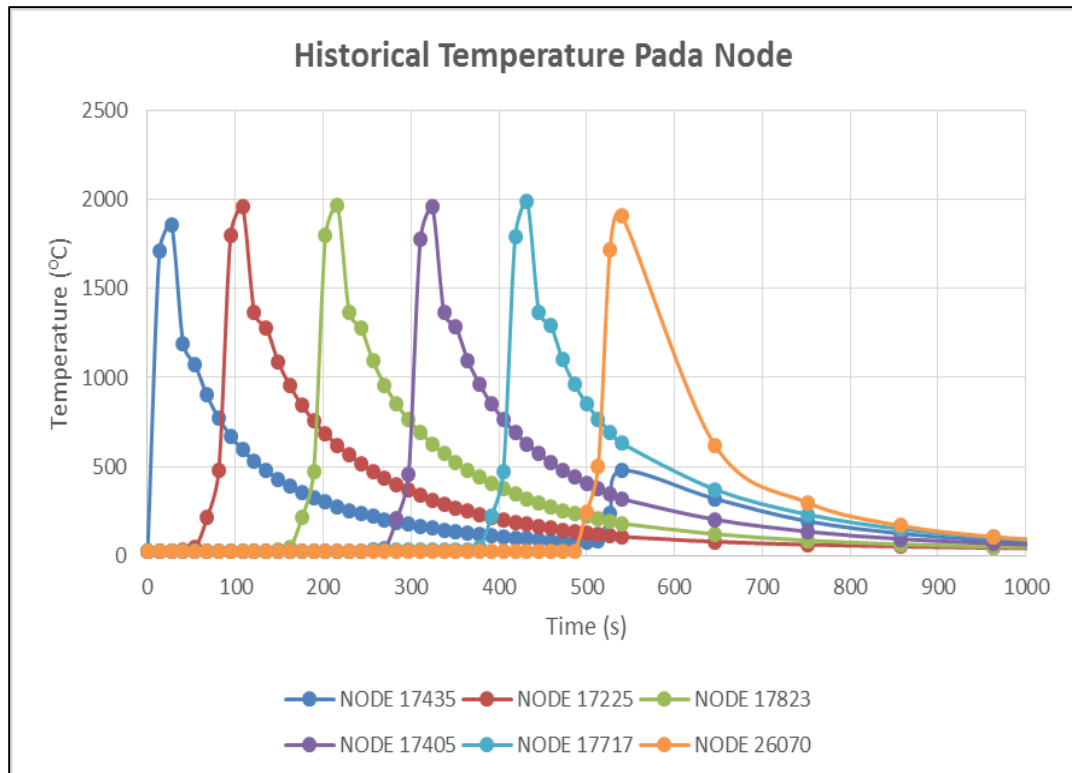
Nomor Load Step	Time (detik)	Area
Load Step 1	27	16
Load Step 2	54	14
Load Step 3	81	12
Load Step 4	108	10
Load Step 5	135	26
Load Step 6	162	25
Load Step 7	189	23
Load Step 8	216	27
Load Step 9	243	22
Load Step 10	270	19
Load Step 11	297	17
Load Step 12	324	15
Load Step 13	351	13
Load Step 14	378	11
Load Step 15	405	9
Load Step 16	432	24
Load Step 17	459	29
Load Step 18	486	21
Load Step 19	513	20
Load Step 20	540	18
Load Step 21	7200	Semua area



Gambar 4. 5. Alur pembebanan pengelasan



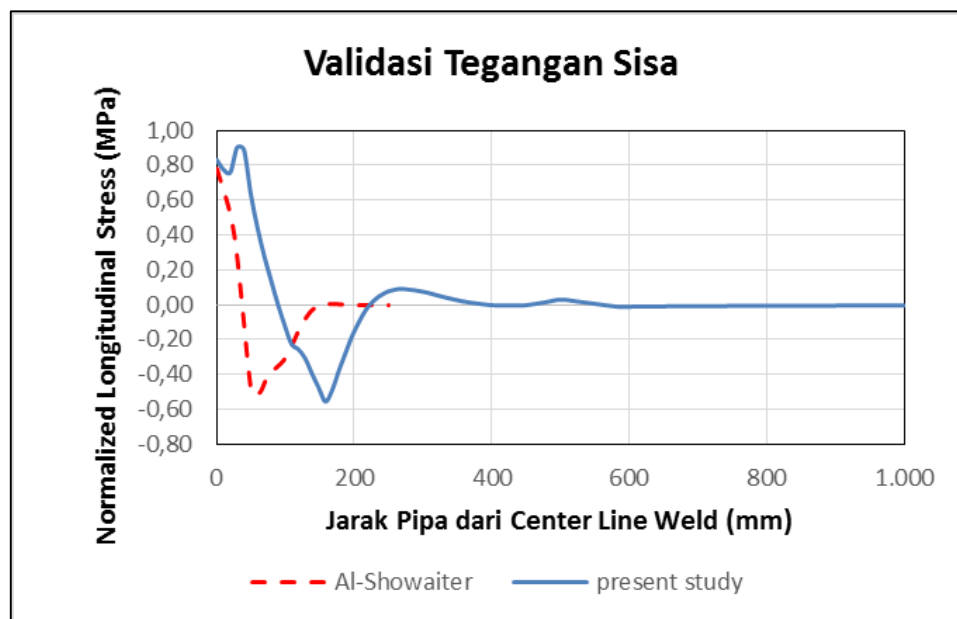
Gambar 4. 6. Validasi temperatur



Gambar 4. 7. Historical Temperatuure Pada Beberapa Node

4.3.2 Validasi Tegangan Sisa

Validasi tegangan sisa yang dilakukan adalah dengan meninjau distribusi tegangan yang terjadi di sepanjang pipa. Dalam hal ini tegangan sisa yang ditinjau sesuai dengan *path line reference* 0 deg pada Gambar 4.1. Dari hasil analisa diperoleh karakteristik tegangan sisa sesuai pada Gambar berikut,

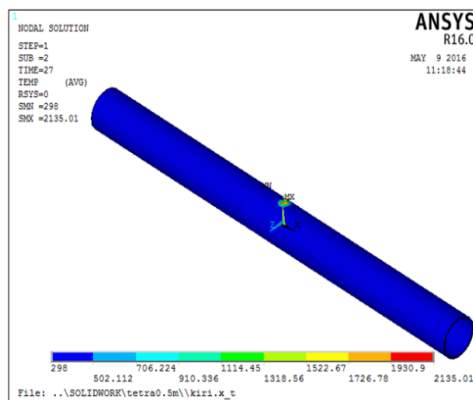


Gambar 4. 8. Validasi Tegangan Sisag

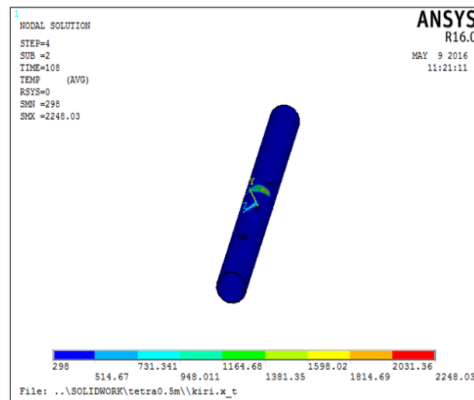
Apabila dibandingkan antara penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan oleh Al-Showaiter dkk (2015), maka karakteristik distribusi tegangan sisa pada arah memanjang memiliki bentuk yang serupa. Dimana tegangan yang terjadi pada daerah *weld center line* pada kondisi tegangan tarik dan bertransformasi menjadi tegangan tekan pada daerah yang lebih jauh dari *weld center line*.

4.4. Analisa Simulasi Pengelasan

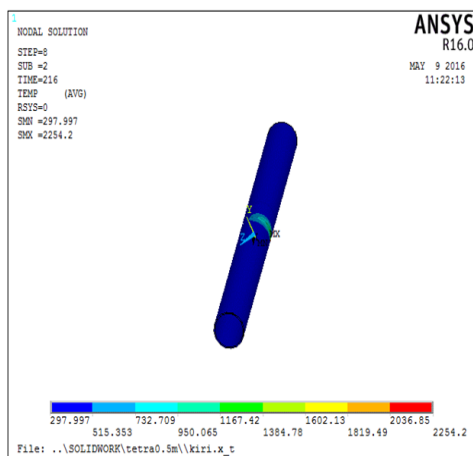
Analisa simulasi pengelasan dilakukan dengan pembebanan pada permukaan pengelasan dengan urutan load step pembebanan sesuai pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.5. Pada Gambar 4.9 menunjukkan beberapa Gambaran simulasi pengelasan pada *load step* 1 hingga 20 dan simulasi pendinginan pasca pengelasan pada *load step* 21.



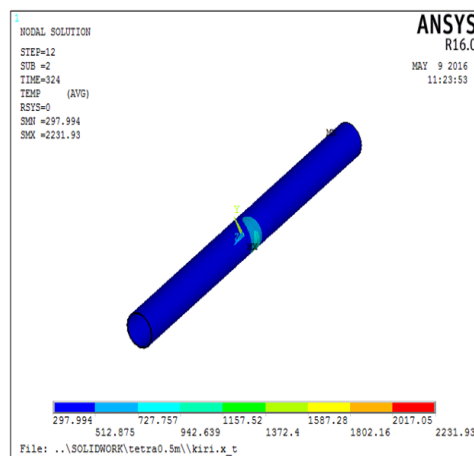
Load Step 1 (27 s)



Load Step 4 (108 s)

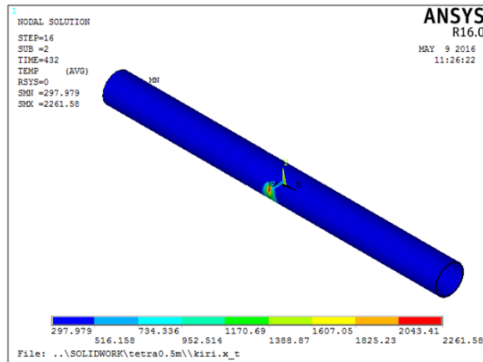


Load Step 8 (216 s)

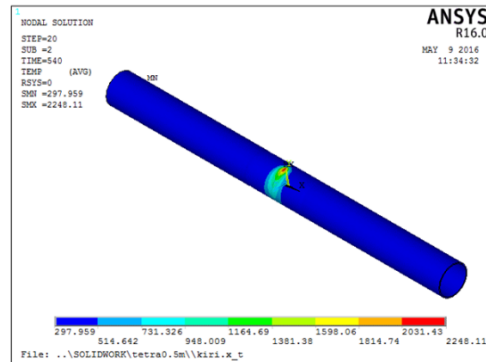


Load Step 12 (324 s)

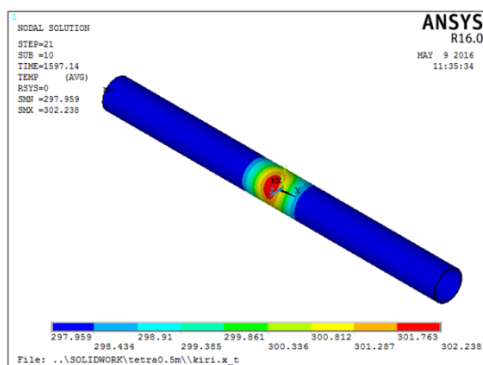
Gambar 4. 9. Urutan pengelasan pipa pada tiap-tiap loadstep



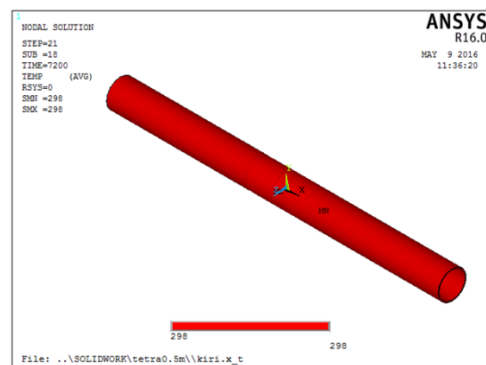
Load Step 16 (432 s)



Load Step 20 (540 s)



Load Step 21 (1597 s)



Load Step 21 (7200 s)

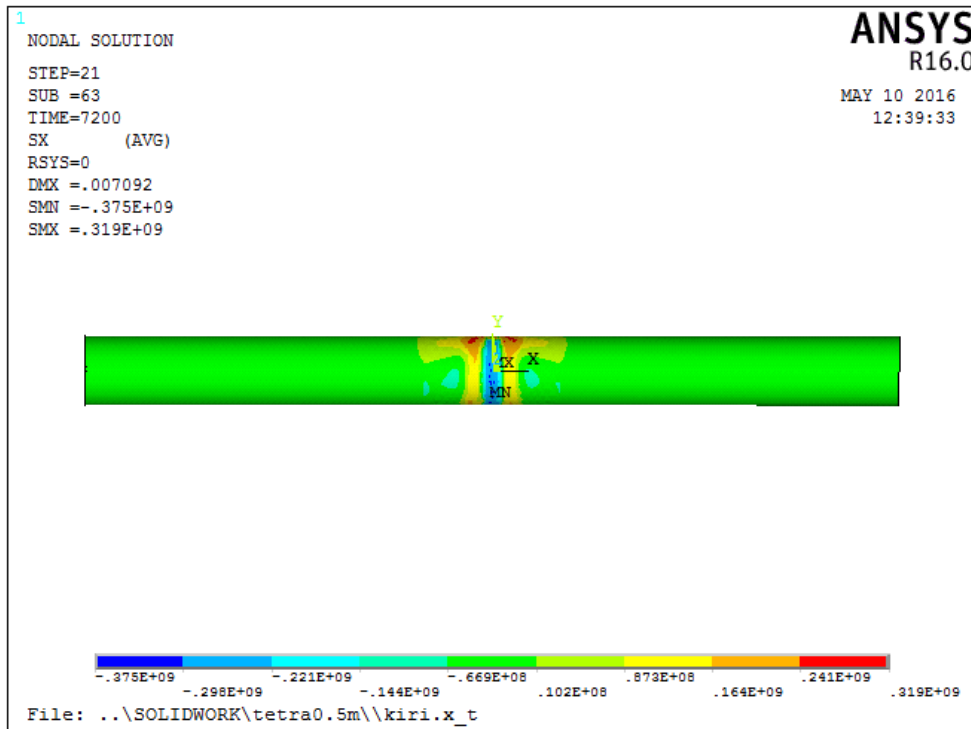
Gambar 4.9 Urutan pengelasan pipa pada tiap-tiap loadstep (lanjutan)

4.5 Analisa Simulasi Tegangan Sisa

Analisa tegangan sisa pada pengelasan pipa ditinjau dari daerah disepanjang pipa. Jenis tegangan sisa yang memiliki pengaruh signifikan adalah tegangan sisa memanjang (*longitudinal stress*) dan tegangan sisa tangensial (*hoop stress*).

4.5.1 Tegangan Sisa Longitudinal

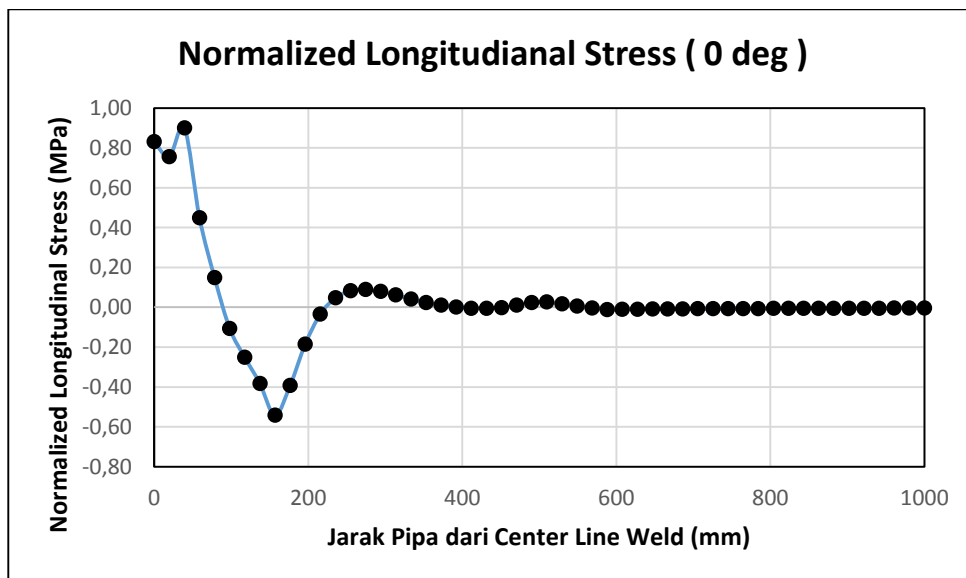
Sesuai pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa tegangan sisa pada arah memanjang bekerja searah dengan sumbu x pada model pipa. Gambaran tegangan sisa tersebut sesuai dengan Gambar 4.10 berikut,



Gambar 4. 10. Tegangan sisa arah memanjang

Dalam penelitian ini dilakukan peninjauan tegangan sisa pada beberapa titik di sepanjang pipa yakni,

a. Tegangan Sisa Longitudinal pada 0 deg

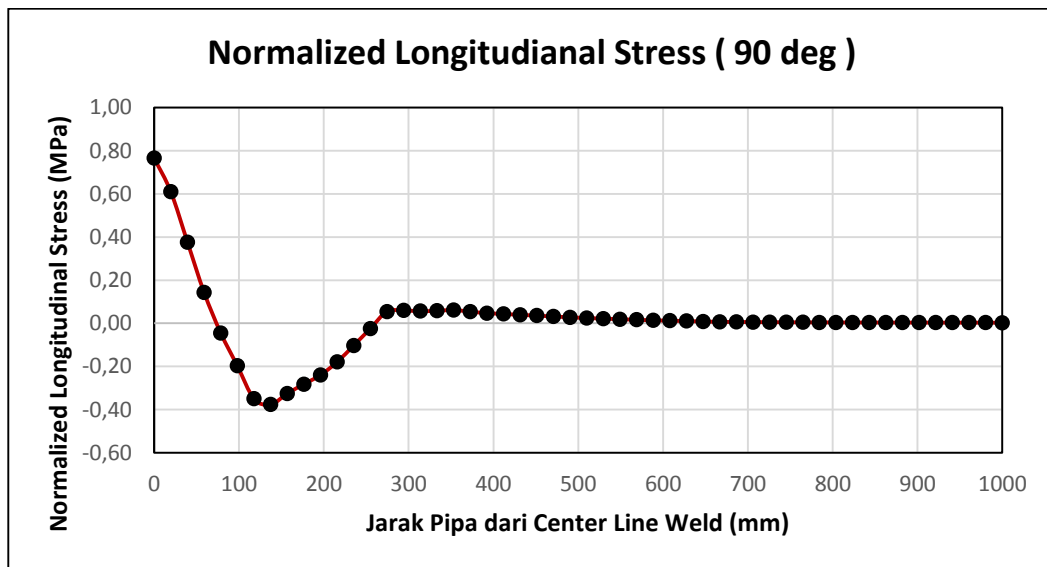


Gambar 4. 11. Tegangan sisa memanjang pada 0 deg

Pada Gambar 4.11 menunjukkan tegangan sisa arah memanjang pada 0 deg. Dimana besar tegangan yang terjadi pada daerah sekitar *weld center line*

mengalami tegangan tarik hingga pada jarak 78 mm dengan puncak perbandingan antara tegangan yang terjadi dengan yield stress sebesar 0,83. Tegangan tersebut mulai mengalami transformasi menjadi tegangan tekan hingga pada jarak 200 mm. Tegangan tekan terbesar terjadi pada perbandingan -0,54 terhadap tegangan *yield*. Pengaruh tegangan sisa mulai menghilang pada daerah sekitar 400 mm dari *weld center line*.

b. Tegangan Sisa Longitudinal pada 90 deg



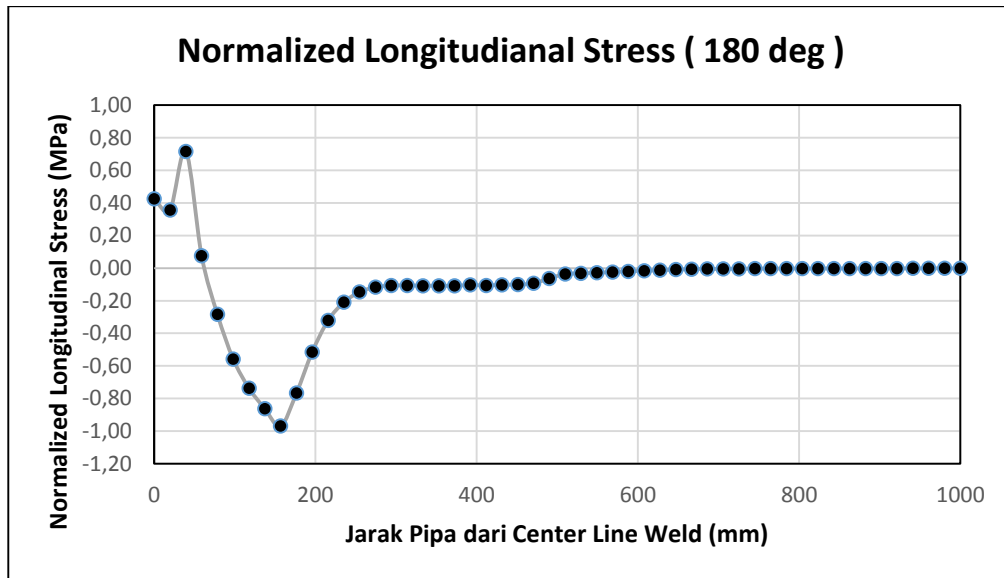
Gambar 4. 12. Tegangan Sisa memanjang pada 90 deg

Pada Gambar 4.12 menunjukkan tegangan sisa arah memanjang pada 90 deg. Dimana besar tegangan yang terjadi pada daerah sekitar *weld center line* mengalami tegangan tarik hingga pada jarak 78 mm dengan puncak perbandingan antara tegangan yang terjadi dengan yield stress sebesar 0,77. Tegangan tersebut mulai mengalami transformasi menjadi tegangan tekan hingga pada jarak 250 mm. Tegangan tekan terbesar terjadi pada perbandingan -0,38 terhadap tegangan *yield*. Pengaruh tegangan sisa mulai menghilang pada daerah sekitar 400 mm dari *weld center line*.

c. Tegangan Sisa Longitudinal pada 180 deg

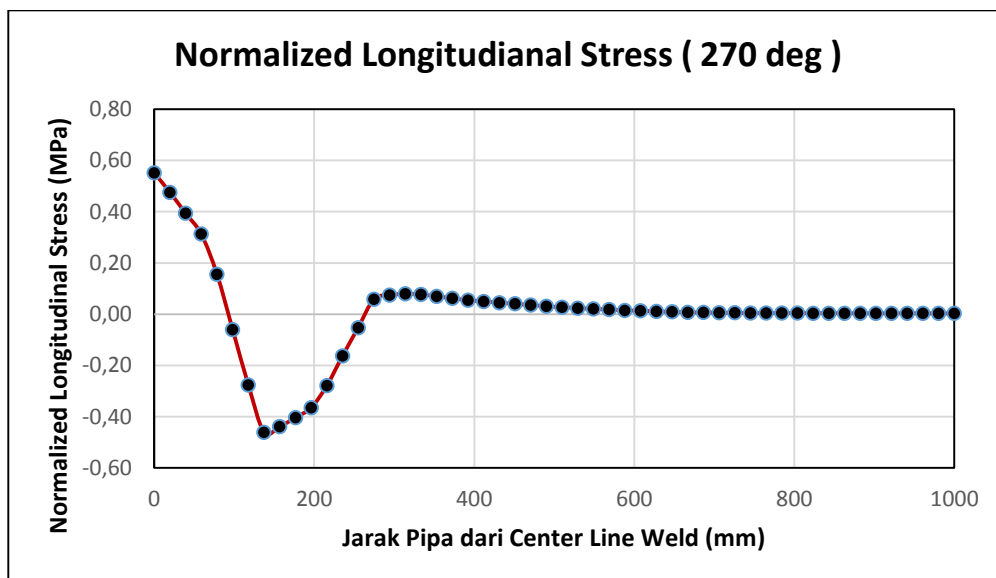
Pada Gambar 4.13 menunjukkan tegangan sisa arah memanjang pada 180 deg. Dimana besar tegangan yang terjadi pada daerah sekitar *weld center line* mengalami tegangan tarik hingga pada jarak 58 mm dengan puncak perbandingan antara tegangan yang terjadi dengan yield stress sebesar 0,42.

Tegangan tersebut mulai mengalami transformasi menjadi tegangan tekan hingga pada jarak 600 mm. Tegangan tekan terbesar terjadi pada perbandingan -0,97 terhadap tegangan *yield*. Pengaruh tegangan sisa mulai menghilang pada daerah sekitar 300 mm dari *weld center line*.



Gambar 4. 13. Tegangan Sisa memanjang pada 180 deg

d. Tegangan Sisa Longitudinal pada 270 deg



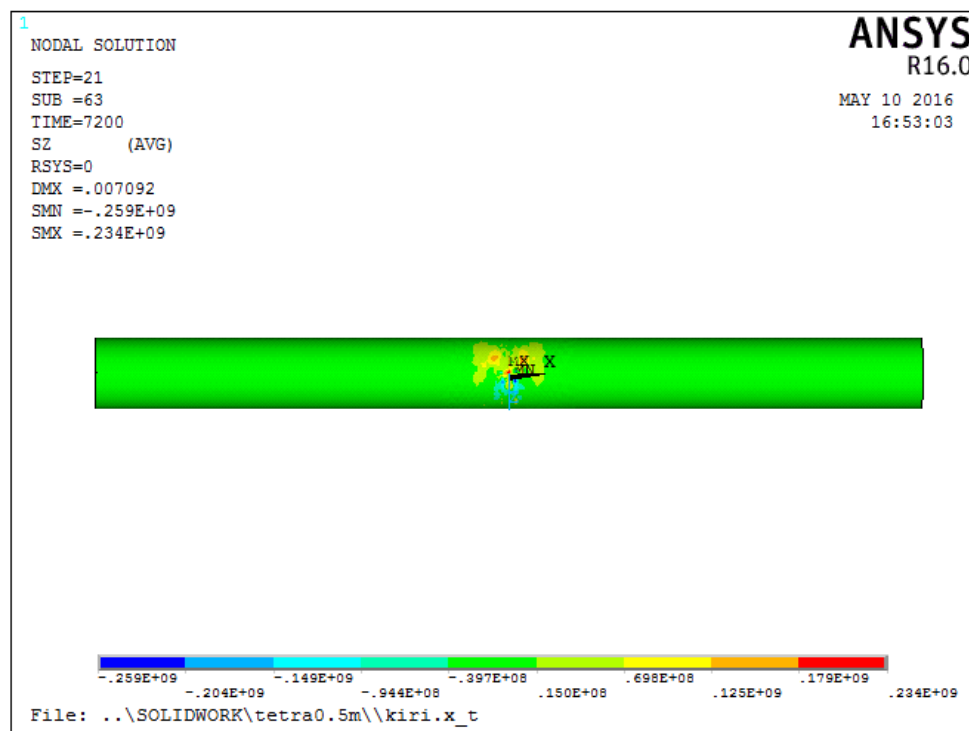
Gambar 4. 14. Tegangan Sisa memanjang pada 180 deg

Pada Gambar 4.14 menunjukkan tegangan sisa arah memanjang pada 270 deg. Dimana besar tegangan yang terjadi pada daerah sekitar *weld center line*

mengalami tegangan tarik hingga pada jarak 78 mm dengan puncak perbandingan antara tegangan yang terjadi dengan yield stress sebesar 0,55. Tegangan tersebut mulai mengalami transformasi menjadi tegangan tekan hingga pada jarak 274 mm. Tegangan tarik terbesar terjadi pada perbandingan -0,46 terhadap tegangan *yield*. Pengaruh tegangan sisa mulai menghilang pada daerah sekitar 400 mm dari *weld center line*.

4.5.2 Tegangan Sisa Tangensial

Tegangan sisa tangensial bekerja secara tangensial pada permukaan pipa. Gambaran tegangan sisa secara tangensial akibat pengelasan pipa adalah sesuai dengan Gambar 4.15 berikut,

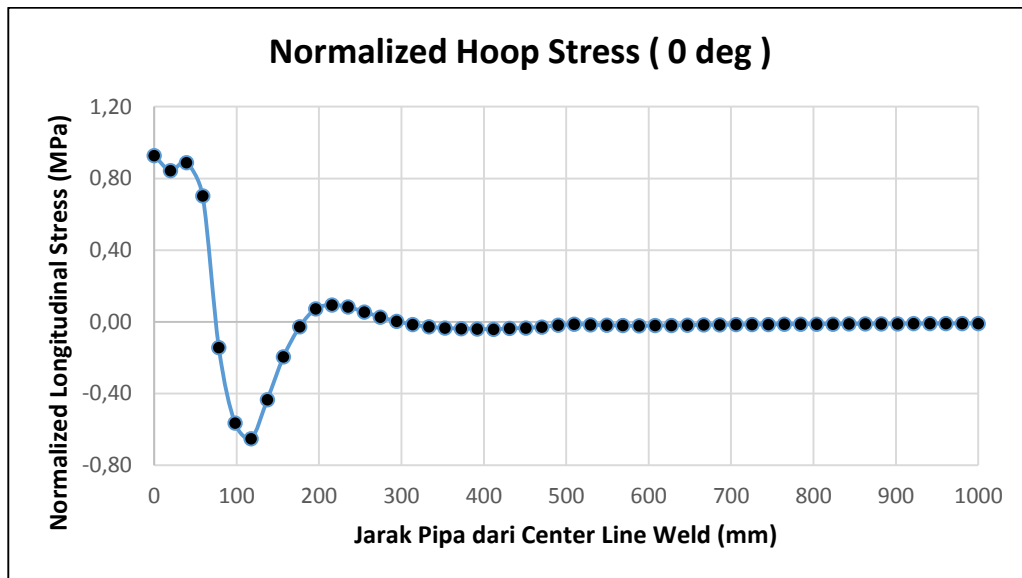


Gambar 4. 15. Tegangan sisa arah tangensial

a. Tegangan Sisa Tangensial Pada 0 deg

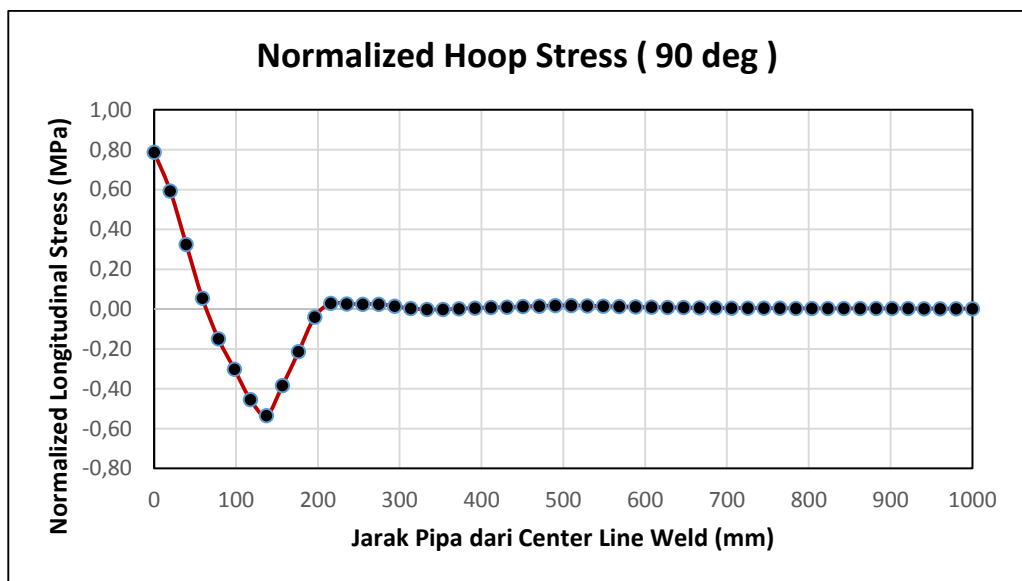
Pada Gambar 4.16 menunjukkan tegangan sisa tangensial pada 0 deg. Dapat dideskripsi bahwa tegangan tangensial pada daerah disekitar *weld center line* mengalami tegangan tarik dengan puncak perbandingan terbesar yakni 0,93 terhadap tegangan *yield*. Tegangan tarik mulai bertransformasi menjadi tegangan tekan pada daerah sekitar 58 mm dari *weld center line* dengan puncak tegangan tekan sebesar -0,65 terhadap tegangan *yield*. Tegangan

tangensial mulai tidak berpengaruh signifikan pada daerah 300 mm dari *weld center line*.



Gambar 4. 16. Tegangan Sisa tangensial pada 0 deg

b. Tegangan Sisa Tangensial Pada 90 deg

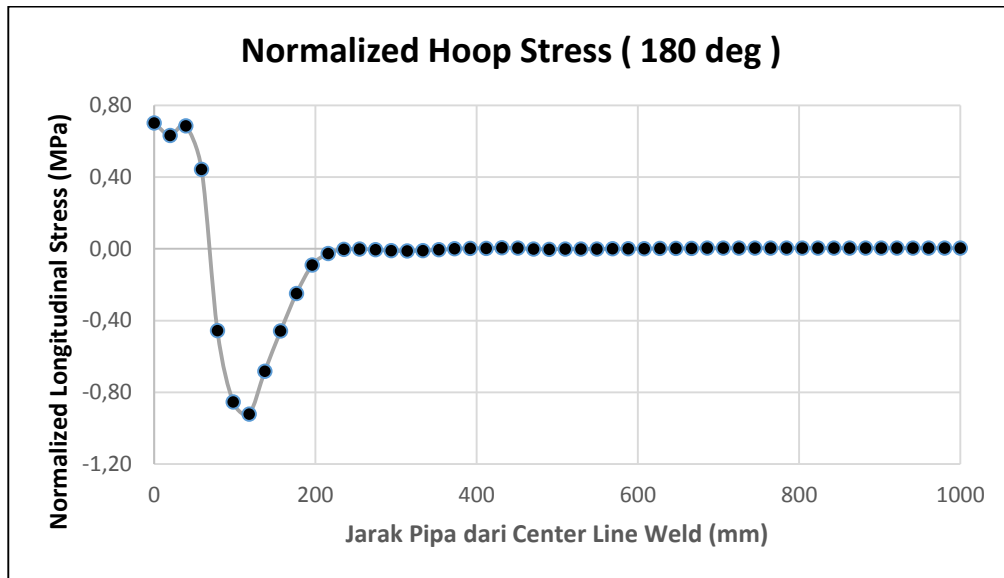


Gambar 4. 17. Tegangan Sisa tangensial pada 90 deg

Pada Gambar 4.17 menunjukkan tegangan sisa tangensial pada 90 deg. Dapat dideskripsi bahwa tegangan tangensial pada daerah disekitar *weld center line* mengalami tegangan tarik dengan puncak perbandingan terbesar yakni 0,79 terhadap tegangan *yield*. Tegangan tarik mulai bertransformasi menjadi tegangan tekan pada daerah sekitar 58 mm dari *weld center line* dengan

puncak tegangan tekan sebesar -0,53 terhadap tegangan *yield*. Tegangan tangensial mulai tidak berpengaruh signifikan pada daerah 300 mm dari *weld center line*.

c. Tegangan Sisa Tangensial Pada 180 deg



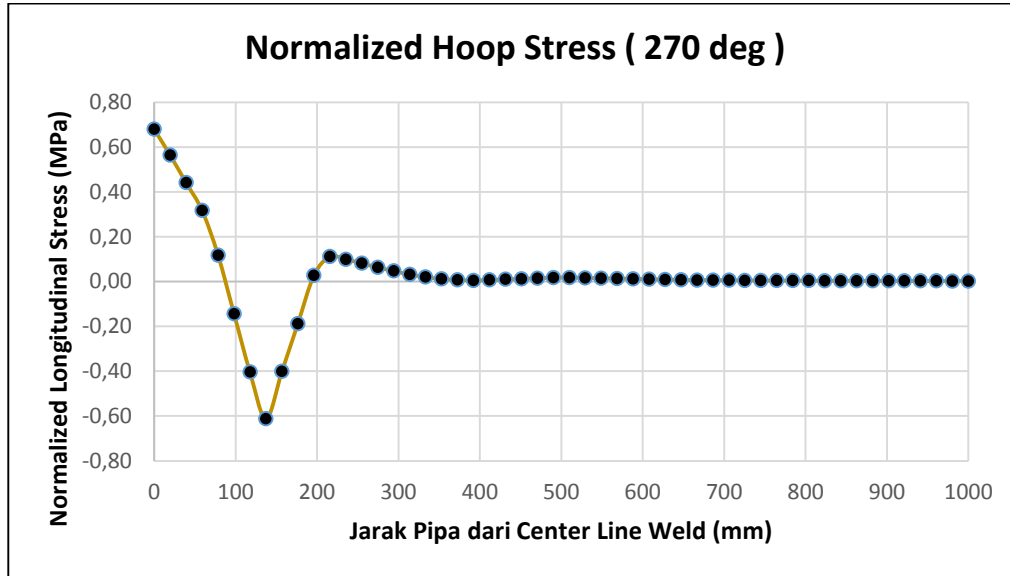
Gambar 4. 18. Tegangan Sisa tangensial pada 180 deg

Pada Gambar 4.18 menunjukkan tegangan sisa tangensial pada 180 deg. Dapat dideskripsi bahwa tegangan tangensial pada daerah disekitar *weld center line* mengalami tegangan tarik dengan puncak perbandingan terbesar yakni 0,70 terhadap tegangan *yield*. Tegangan tarik mulai bertransformasi menjadi tegangan tekan pada daerah sekitar 58 mm dari *weld center line* dengan puncak tegangan tekan sebesar -0,92 terhadap tegangan *yield*. Tegangan tangensial mulai tidak berpengaruh signifikan pada daerah 200 mm dari *weld center line*.

d. Tengan Sisa Tangensial Pada 270 deg

Pada Gambar 4.19 menunjukkan tegangan sisa tangensial pada 270 deg. Dapat dideskripsi bahwa tegangan tangensial pada daerah disekitar *weld center line* mengalami tegangan tarik dengan puncak perbandingan terbesar yakni 0,68 terhadap tegangan *yield*. Tegangan tarik mulai bertransformasi menjadi tegangan tekan pada daerah sekitar 78 mm dari *weld center line* dengan puncak tegangan tekan sebesar -0,61 terhadap tegangan *yield*.

Tegangan tangensial mulai tidak berpengaruh signifikan pada daerah 200 mm dari *weld center line*.



Gambar 4. 19. Tegangan Sisa tangensial pada 180 deg

4.5.3 Simulasi *Local Buckling*

Dalam simulasi ini dilakukan pembebanan berupa beban momen sesuai pada Gambar 3.21 pada kedua model pipa yakni pipa dengan pengaruh tegangan sisa dan tanpa pengaruh tegangan sisa.

4.5.3.1 Analisa Momen Kritis

Dalam analisa ini beban momen yang diberikan berupa beban momen kritis yang menyebabkan struktur mengalami respon kritis sesaat sebelum terjadi buckling. Analisa untuk menentukan momen buckling dilakukan dengan menggunakan modul Eigenvalue Buckling pada ANSYS Workbench untuk diperoleh harga momen kritis pada tiap-tiap model. Hasil dari analisa tersebut adalah sebagai berikut,

Tabel 4. 3. Hasil momen kritis

Tipe Model	Momen Kritis (kN-m)
No-residual stress	9,70E+05
Residual stress	9,40E+05

4.5.3.2 Validasi Momen Kritis

Harga momen kritis pada penelitian ini divalidasikan dengan code standart yakni DNV OS F 101 sesuai dengan hasil analisa sesuai Tabel 4.4,

Tabel 4. 4. Validasi momen kritis

Kriteria	SOFTWARE (N-m)	DNV OS F101 (N-m)	Error
Momen Kritis	970000	1026351	5,49%

Dengan memasukkan harga γ_{sc} , γ_m , dan α_c

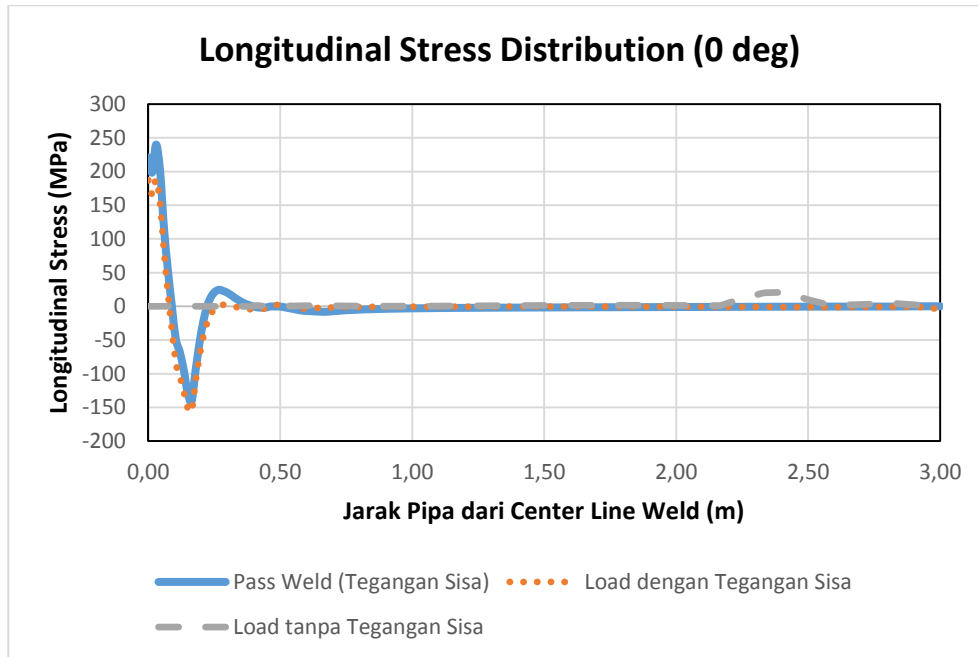
$\frac{\text{Momen Design}}{\text{Momen Ijin}}$	\leq	1	
$\frac{1269439}{1231621,632}$	\leq	1	
1,06	\leq	1	(BUCKLING CRITERIA)

Dari hasil perhitungan Tabel 4.4 menunjukkan bahwa harga momen kritis berdasarkan ANSYS 16.0 didapat sebesar 970 k-Nm. Sedangkan pada hasil perhitungan manual menggunakan DNV OS F101 didapatkan harga momen kritis sebesar 1026 k-Nm. Dimana dari hasil perhitungan keduanya memiliki selisih error sebesar 5,4 persen. Apabila beban momen kritis pada kedua perhitungan dikorelasikan dengan harga γ_{sc} , γ_m , dan α_c sesuai pada persamaan 2.36 didapatkan rasio keamanan sebesar 1,06 atau berada pada kondisi kriteria buckling.

4.5.3.3 Distribusi Tegangan Akibat Momen Kritis

Distribusi tegangan akibat beban kritis di deskripsikan pada Gambar 4.20 dan 4.21 dengan pengecekan tagangan yang terdiri atas tegangan memanjang (*longitudinal*) dan tangensial (*hoop*) yang dilakukan pada pathline 0°, 90°, 180°, 270°.

A. Distribusi Tegangan Memanjang 0 deg

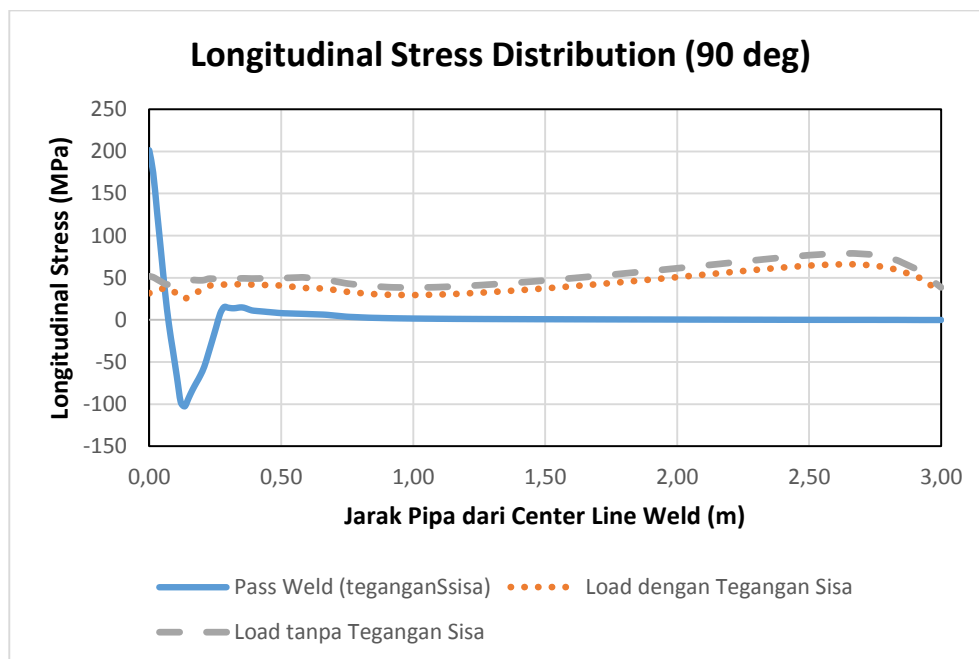


Gambar 4. 20. Distribusi tegangan memanjang 0 deg

Pada Gambar 4.20 menunjukkan hasil distribusi tegangan memanjang akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 0 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan lebih rendah dibandingkan sebelum diberi beban kritis (*pass weld*) dengan puncak faktor penurunan tegangan yakni 0.15 pada daerah disekitar pengelasan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,5 m harga distribusi tegangan mulai tidak signifikan. Sedangkan pada model pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang tidak signifikan. Pada daerah dari *weld centerline* hingga daerah ujung pipa.

B. Distribusi Tegangan Memanjang 90 deg

Pada Gambar 4.21 menunjukkan hasil distribusi tegangan memanjang akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 90 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan sebelum diberi beban kritis (*pass weld*) dengan puncak faktor penurunan tegangan yakni 0.84 pada daerah disekitar pengelasan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,5 m harga distribusi tegangan mulai dipengaruhi oleh beban momen kritis hingga daerah diujung pipa. Sedangkan pada model pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang memiliki karakteristik serupa dengan pipa dengan tegangan sisa, tetapi dengan harga distribusi tegangan yang lebih tinggi. Pada kedua model pipa setelah diberikan beban kritis memiliki harga distribusi tegangan tarik didaerah sepanjang pipa.

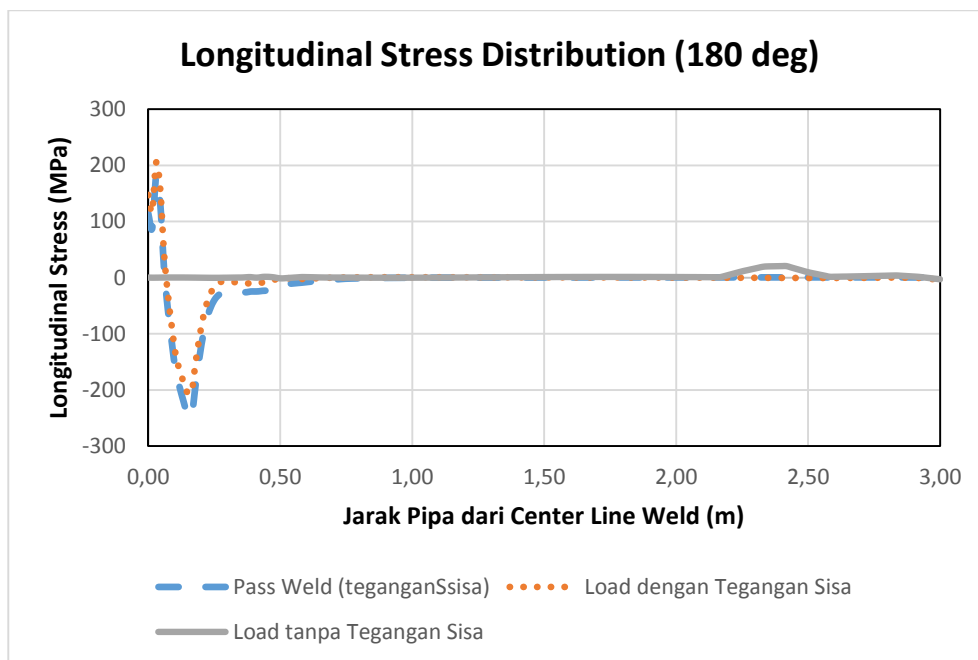


Gambar 4. 21. Distribusi tegangan memanjang 90 deg

C. Distribusi Tegangan Memanjang 180 deg

Pada Gambar 4.22 menunjukkan hasil distribusi tegangan memanjang akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 180 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan

siswa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan sedikit lebih meningkat dibandingkan sebelum diberi beban kritis (*pass weld*) dengan puncak faktor kenaikan tegangan yakni 0.28 pada daerah disekitar pengelasan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,3 m harga distribusi tegangan mulai tidak signifikan. Sedangkan pada model pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang tidak signifikan. Pada daerah dari *weld centerline* hingga daerah ujung pipa.

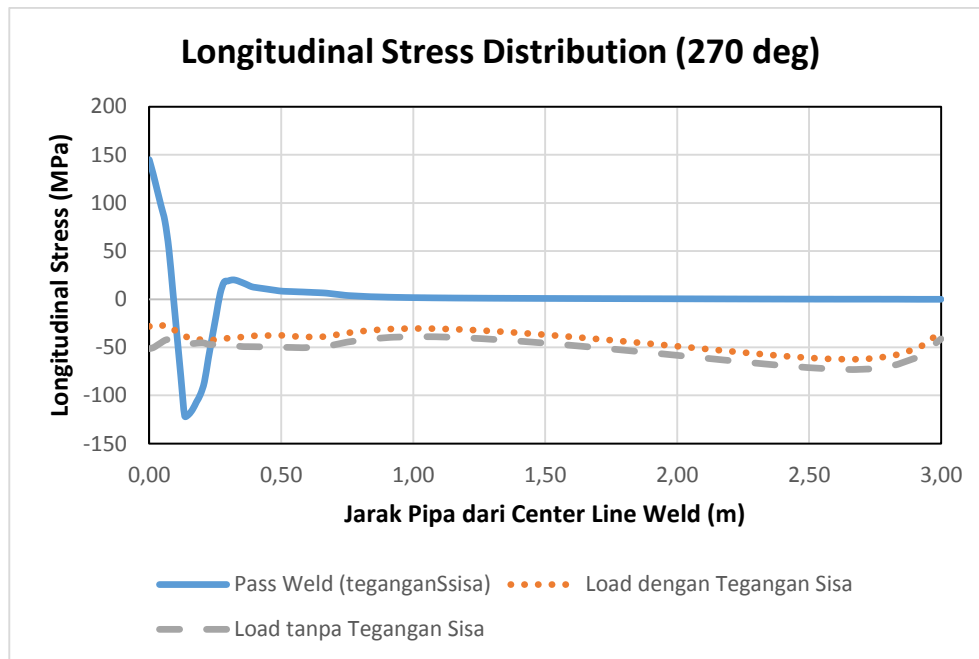


Gambar 4. 22. Distribusi tegangan memanjang 180 deg

D. Distribusi Tegangan Memanjang 270 deg

Pada Gambar 4.23 menunjukkan hasil distribusi tegangan memanjang akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 270 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan sebelum diberi beban kritis (*pass weld*) dengan puncak faktor penurunan tegangan yakni 0.84 pada daerah disekitar pengelasan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,5 m harga distribusi tegangan mulai dipengaruhi oleh beban momen kritis hingga daerah diujung pipa. Sedangkan pada model pipa tanpa pengaruh

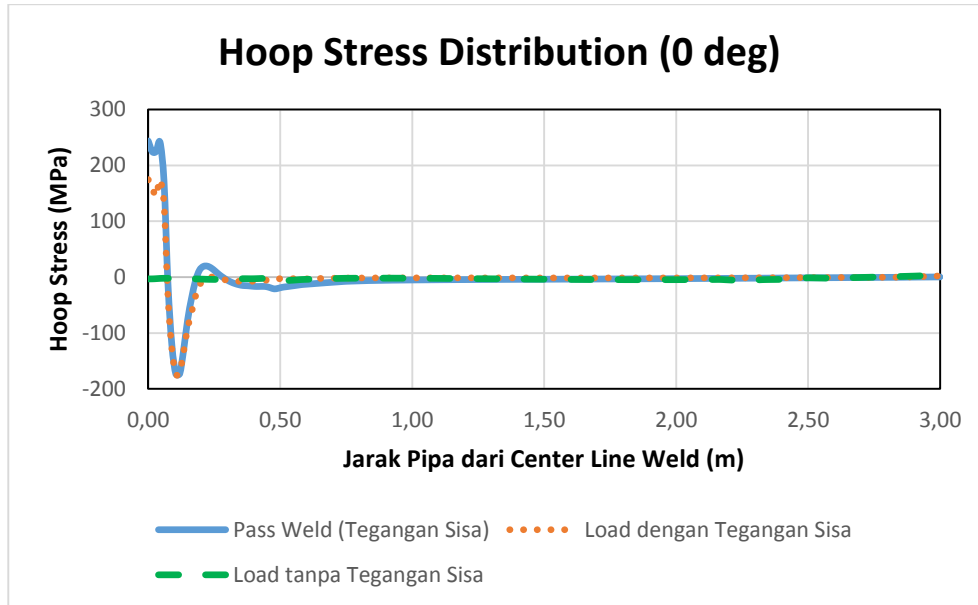
tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang memiliki karakteristik serupa dengan pipa dengan tegangan sisa, tetapi dengan harga distribusi tegangan yang lebih tinggi. Pada kedua model pipa setelah diberikan beban kritis memiliki harga distribusi tegangan tekan didaerah sepanjang pipa.



Gambar 4. 23. Distribusi tegangan memanjang 270 deg

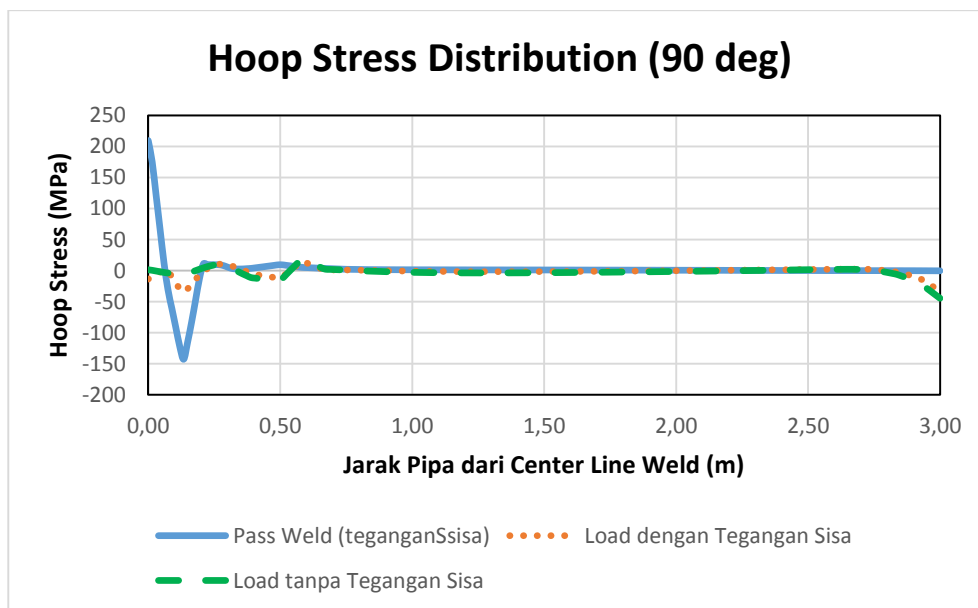
E. Distribusi Tegangan Tangensial 0 deg

Pada Gambar 4.24 menunjukkan hasil distribusi tegangan tangensial akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 0 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan lebih rendah dibandingkan sebelum diberi beban kritis (*pass weld*) dengan puncak faktor penurunan tegangan yakni 0.28 pada daerah disekitar pengelasan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,3 m harga distribusi tegangan mulai tidak signifikan. Sedangkan pada model pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang tidak signifikan pada daerah dari *weld centerline* hingga daerah ujung pipa.



Gambar 4. 24. Distribusi tegangan tangensial 0 deg

F. Distribusi Tegangan Tangensial 90 deg

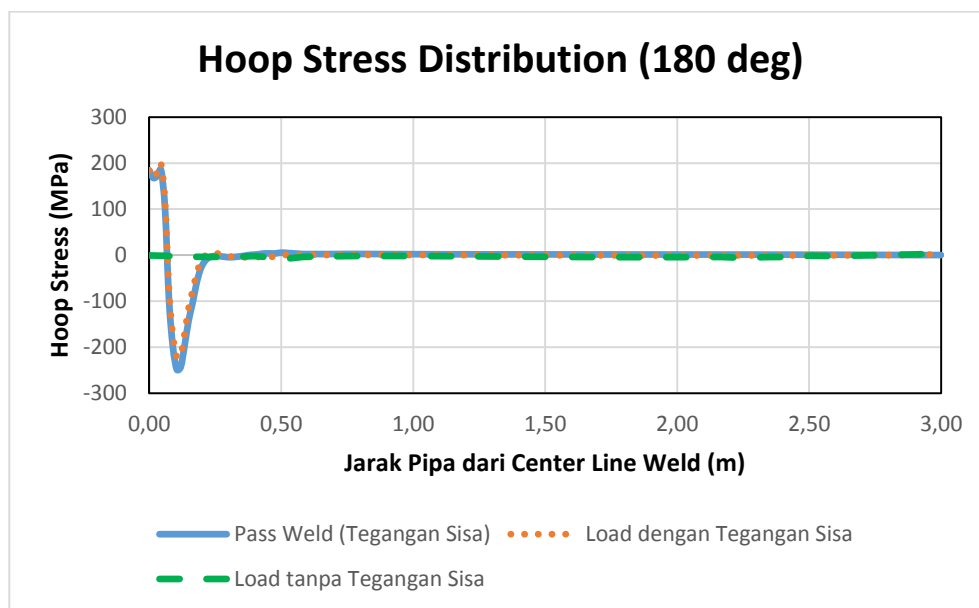


Gambar 4. 25. Distribusi tegangan tangensial 90 deg

Pada Gambar 4.25 menunjukkan hasil distribusi tegangan tangensial akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 90 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan sebelum diberi beban kritis (*pass weld*) dengan puncak

faktor penurunan tegangan yakni 0.94 pada daerah disekitar pengelasan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,2 m harga distribusi tegangan mulai dipengaruhi oleh beban momen kritis hingga daerah diujung pipa. Sedangkan pada model pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang memiliki karakteristik serupa dengan pipa dengan tegangan sisa, tetapi dengan harga distribusi tegangan yang lebih tinggi. Pada kedua model pipa setelah diberikan beban kritis memiliki harga distribusi tegangan yang cukup rendah apabila dibandingkan dengan pipa pasca pengelasan (*pass weld*).

G. Distribusi Tegangan Tangensial 180 deg

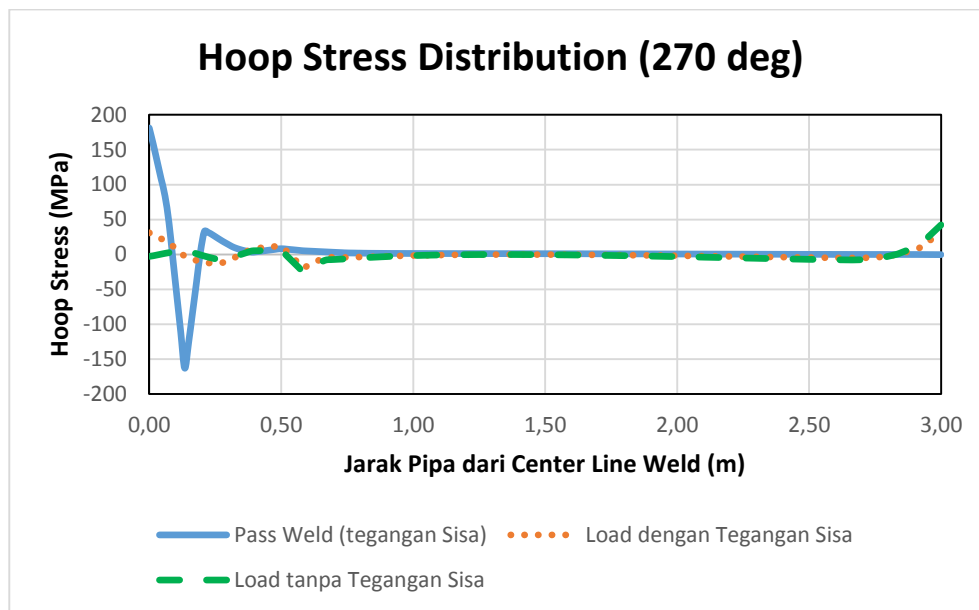


Gambar 4. 26. Distribusi tegangan tangensial 180 deg

Pada Gambar 4.26 menunjukkan hasil distribusi tegangan tangensial akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 180 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan yang hampir berimpit dengan beban kritis (*pass weld*) dengan distribusi tarik dan tekan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,3 m harga distribusi tegangan mulai tidak signifikan. Sedangkan pada model pipa tanpa

pengaruh tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang tidak signifikan pada daerah dari *weld centerline* hingga daerah ujung pipa.

H. Distribusi Tegangan Tangensial 270 deg

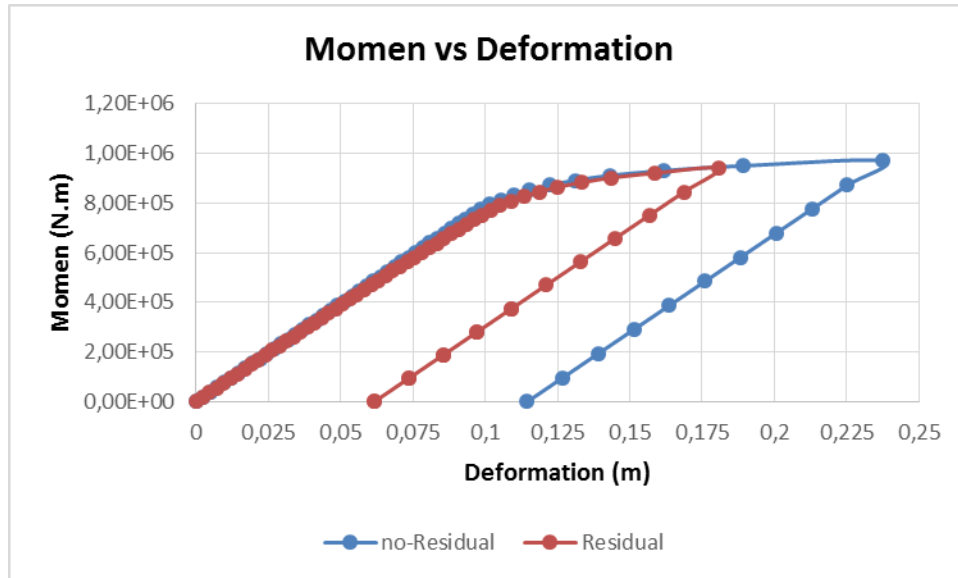


Gambar 4. 27. Distribusi tegangan tangensial 270 deg

Pada Gambar 4.27 menunjukkan hasil distribusi tegangan tangensial akibat beban momen kritis pada kedua model pipa dengan referensi tinjauan 270 deg. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa pasca diberikan beban kritis menghasilkan distribusi tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan sebelum diberi beban kritis (*pass weld*) dengan puncak faktor penurunan tegangan yakni 0.82 pada daerah disekitar pengelasan. Namun pada daerah yang jauh dari pengelasan yakni diatas 0,3 m harga distribusi tegangan mulai dipengaruhi oleh beban momen kritis hingga daerah diujung pipa. Sedangkan pada model pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dihasilkan distribusi tegangan yang memiliki karakteristik serupa dengan pipa dengan tegangan sisa, tetapi dengan harga distribusi tegangan yang lebih tinggi. Pada kedua model pipa setelah diberikan beban kritis memiliki harga distribusi tegangan yang cukup rendah apabila dibandingkan ddengan pipa pasca pengelasan (*pass weld*).

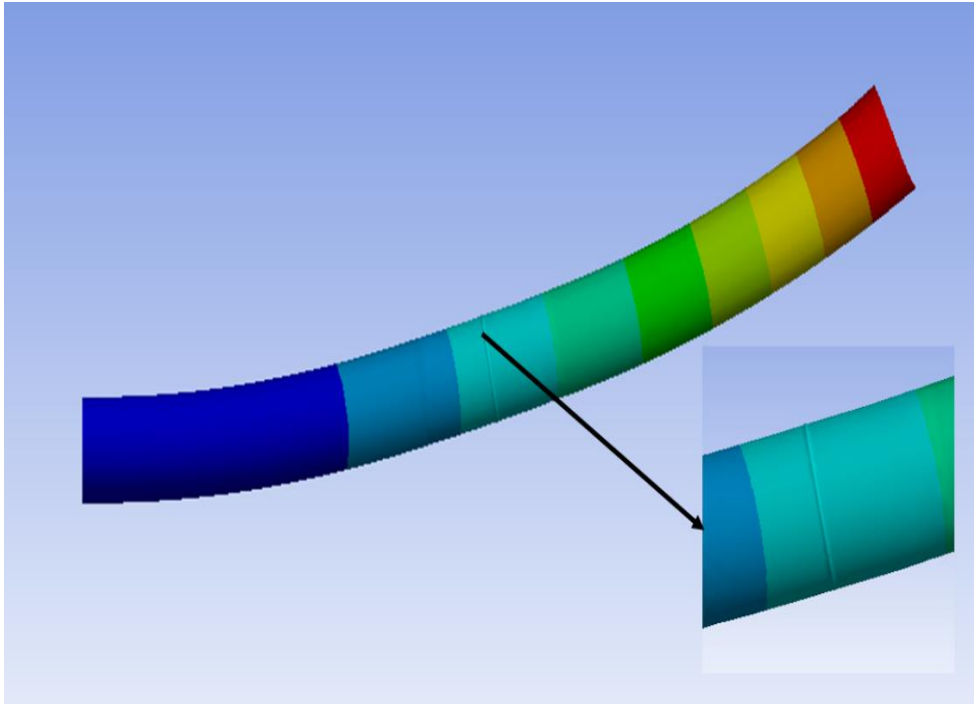
4.5.3.3 Deformasi Akibat Momen Kritis

Pada saat struktur mengalami buckling maka struktur tersebut akan memiliki perubahan deformasi yang cukup besar meskipun diberikan beban dengan harga yang tetap. Apabila beban momen kritis (Tabel 4.3) diaplikasikan pada kedua model pipa maka hasil dari hubungan momen dan deformasi yang terjadi adalah sebagai berikut,

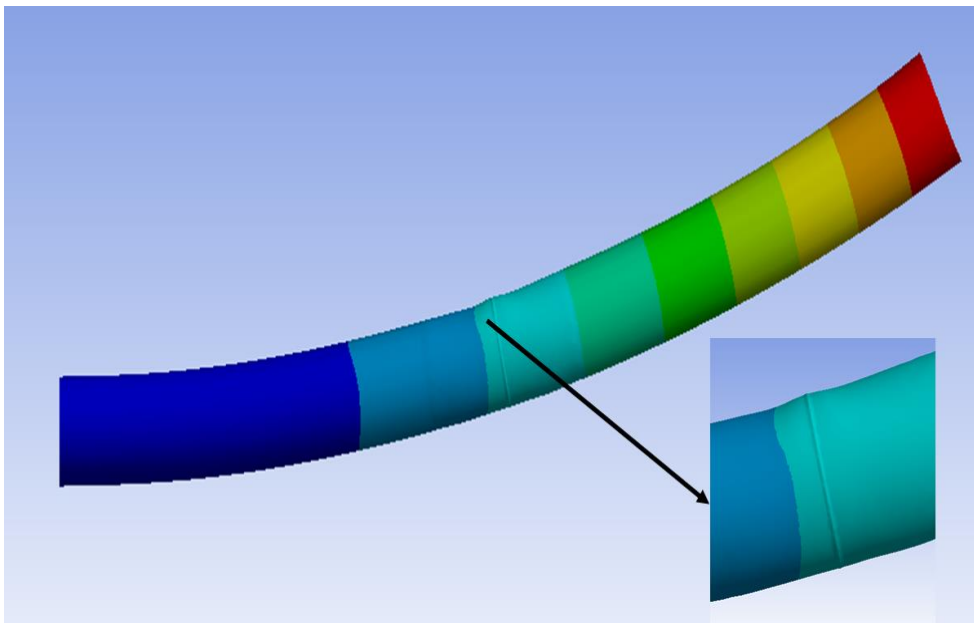


Gambar 4. 28. Hubungan beban momen dan deformasi

Pada Gambar 4.28 menunjukkan hubungan antara momen dan deformasi yang terjadi pada kedua model pipa. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa model pipa dengan pengaruh tegangan sisa memiliki kapasitas terhadap beban momen yang lebih rendah dibandingkan pipa tanpa pengaruh tegangan sisa. Pada pipa dengan tegangan sisa mulai mengalami buckling pada harga momen 940 kN.m, sedangkan pada pipa tanpa tegangan sisa mulai mengalami buckling pada harga 970 kN.m. Dari grafik secara keseluruhan menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi mengalami perubahan yang cukup besar ketika beban berupa momen kritis diberikan. Dari analisa secara visual menunjukkan pada pipa tanpa pengaruh tegangan sisa (Gambar 4.29) setelah diberikan beban kritis tidak dihasilkan lekukan lokal, sedangkan pipa dengan pengaruh tegangan sisa (Gambar 4.30) dihasilkan lekukan pasca diberikan beban kritis.



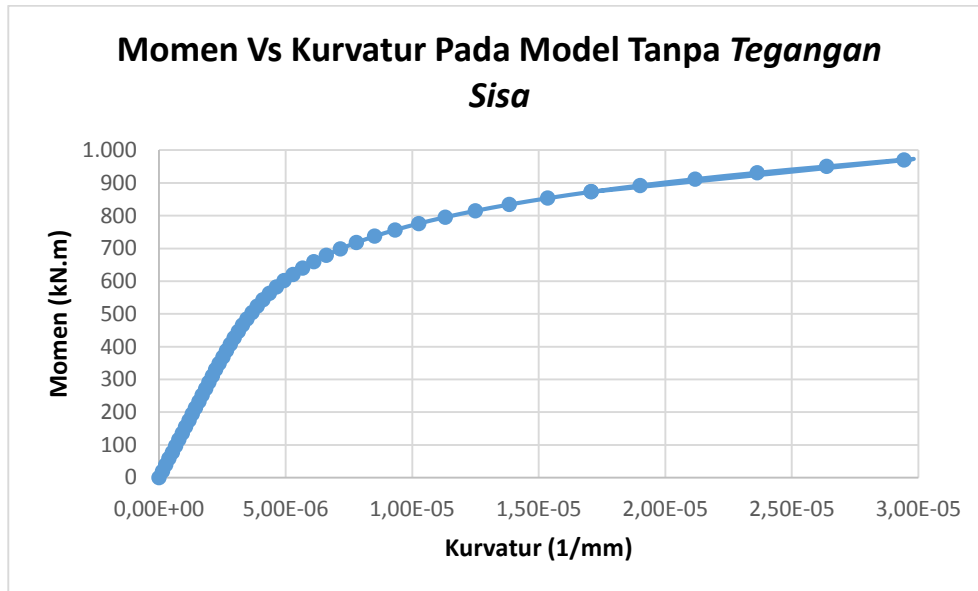
Gambar 4. 29. Deformasi pada model pipa tanpa tegangan sisa



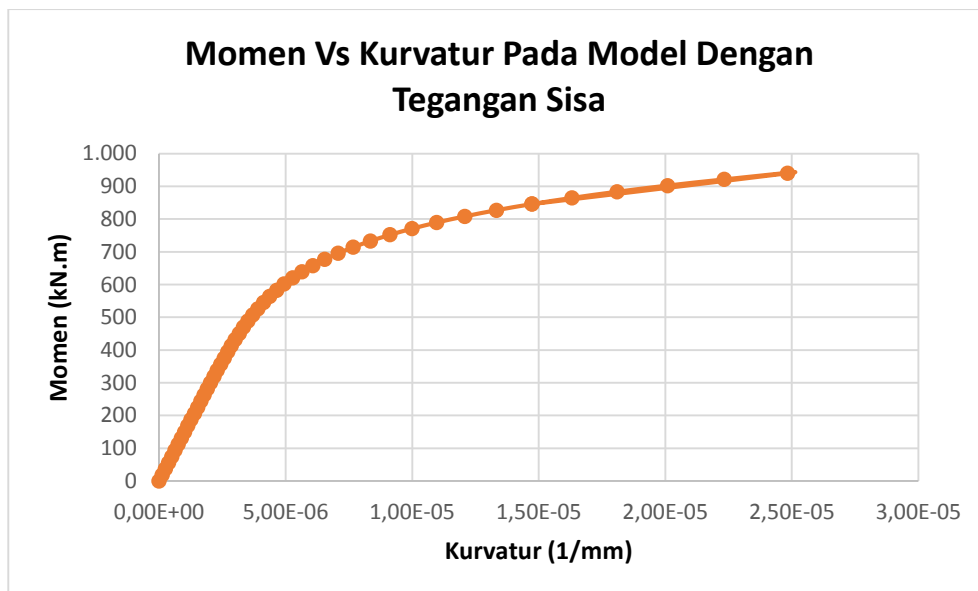
Gambar 4. 30. Deformasi pada model pipa dengan tegangan sisa

4.5.3.4 Analisa Momen Vs Kurvatur

Berikut ini merubakan hubungan momen dengan kurvatur pada pipa terhadap pengaruh tegangan sisa dan tanpa pengaruh tegangan sisa dengan hasil adalah sebagai berikut,



Gambar 4. 31. Momen dan kurvatur pada model tanpa tegangan sisa



Gambar 4. 32. Momen dan kurvatur pada model dengan tegangan sisa

Pada Gambar 4.31 dan Gambar 4.32 menunjukkan hasil plot grafik hubungan antara beban momen dan kapasitas regangan (kurvatur) yang terjadi pada kedua model pipa. Dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa (Gambar 4.32) menghasilkan kapasitas regangan

yang lebih rendah apabila dibandingkan pada pipa tanpa pengaruh tegangan sisa (Gambar 4.31). Dimana selisih kapasitas regangan adalah sebesar 0,84 kali pada pipa tanpa pengaruh tegangan sisa. Hal ini menunjukkan bahwa adanya pengaruh tegangan sisa menyebabkan pipa mengalami *imperfection* yang mana akan mengurangi kapasitas regangan struktur yang berpengaruh pada kerentanan terhadap *local buckling* pada pipa.

LAMPIRAN A

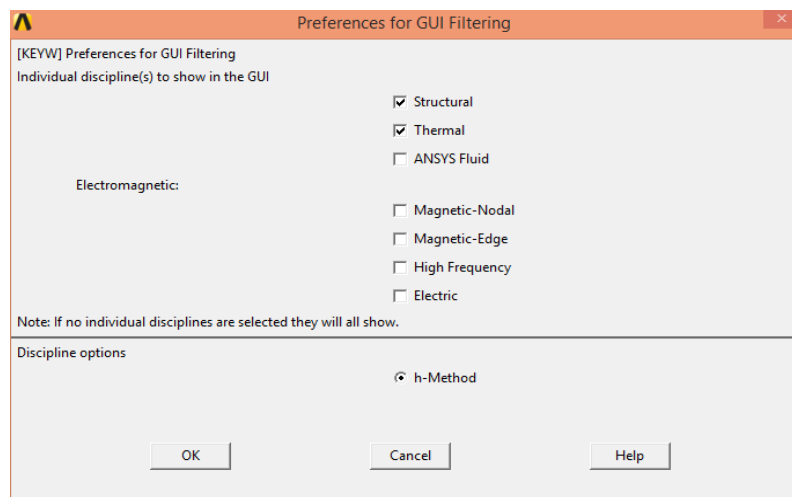
PEMODELAN ANSYS

A.1 PEMODELAN GEOMETRI

1. Memilih disiplin ilmu

Disiplin ilmu yang dipilih pada pemodelan ini adalah *thermal* dan *structural*. Dimana pemilihan *thermal* ditujukan untuk simulasi pengelasan dan pemilihan *structural* ditujukan untuk simulasi mekanis pada tegangan sisa dan *Local Buckling*. Perintah yang dilakukan adalah

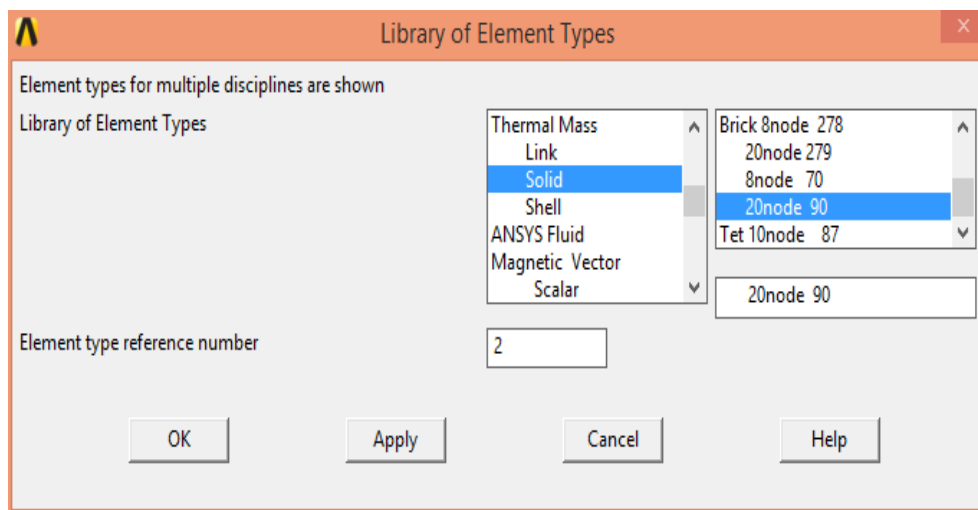
Preferences> pilih ‘thermal dan structural > OK



2. Memilih Tipe Elemen

Pada pemilihan jenis elemen yang disesuaikan dengan jenis analisa yang dilakukan. Pada analisa *thermal* jenis elemen yang dipilih yakni, solid 90 dan Analisa *structural* digunakan elemen solid 186. Perintah yang dilakukan adalah

Preprocessor>element type> add> Thermal mass> pilih elemen>OK



3. Menginputkan Material Properties

Sifat-sifat properti material setiap terjadinya perubahan temperatur diinputkan pada tahap ini. Data properti material yang digunakan sesuai pada tabel 3.2.

Preprocessor>material properties>material model>input properti>OK

4. Import CAD Model

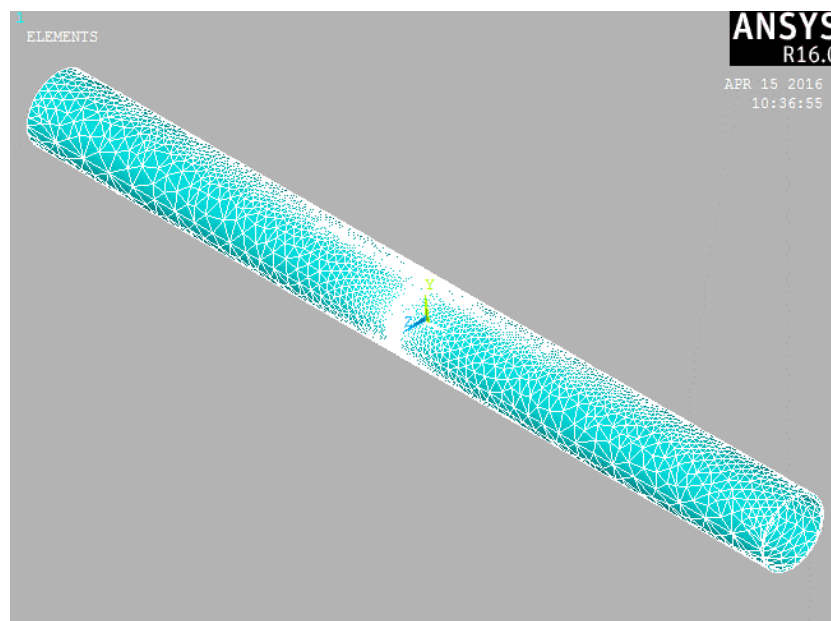
Pada pemodelan bentuk 3-dimensi dilakukan di software Solidwork 2014. Maka dari itu, data pemodelan perlu diimportkan ke ANSYS 16 dalam format IGES *file*. Perintah yang dilakukan adalah,

Main menu >File >Import> IGES file> import

5. Meshing Model

Meshing yang digunakan pada analisa ini adalah *meshing volume* dengan memodifikasi ukuran area model. Ukuran Meshing yang digunakan pada area model ditentukan berdasarkan daerah pada pengelasan. Sehingga dalam analisa ini akan dilakukan pembagian ukuran *meshing* pada tiga daerah yakni, *weldment*, HAZ, dan *base metal* (gambar.. Perintah yang dilakukan adalah

Preprocessor>Meshing>Mesh tool>input ukuran>mesh



6. Pengecekan Meshing

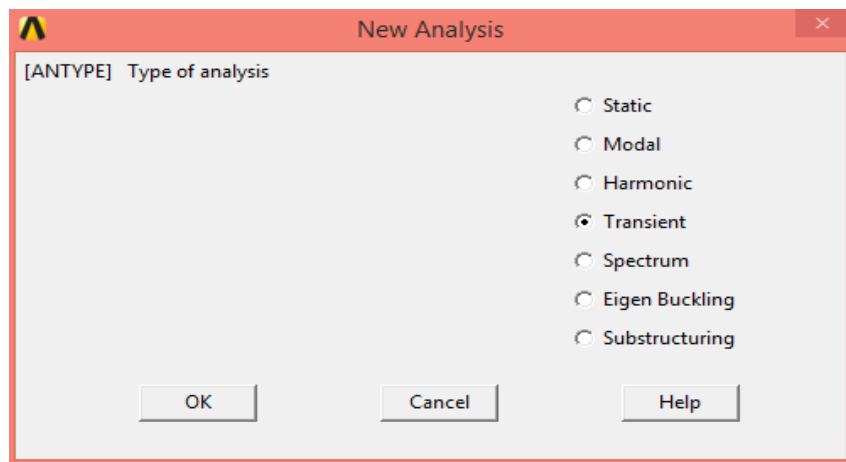
Hasil meshing dicek tiap elemen dan titik simpulnya, rasio ukuran elemen, dan konektivitas antar titik simpul. Pengecekan dilakukan dengan melakukan sensitifitas meshing yang melibatkan pemilihan ukuran elemen secara iteratif hingga didapatkan hasil yang konstan.

A.2 SIMULASI PENGELASAN

1. Pemilihan Tipe Analisa

Dalam penelitian ini jenis analisa yang dipilih adalah transient termal dan transient statis. Analisa transient dipilih karena pembebanan pengelasan yang diberikan berubah terhadap fungsi waktu. Tahapan yang dipilih adalah,

Solution>Analysis Type>New Analysis>Transient>OK



2. Menentukan Referensi dan Uniform Temperatur

Referensi dan uniform temperatur yang digunakan pada saat pengelasan disesuaikan dengan kondisi suhu kamar yakni 25°C atau 298 K. Tahapan yang dipilih adalah,

Solution>Define Load>Setting>Reference Temp>input suhu>OK

Solution>Define Load>Setting>uniform Temp>input suhu>OK

3. Menentukan Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan pada proses pengelasan adalah perbedaan aliran konveksi pada material. Tahapan yang dipilih adalah,

Define Load> apply>thermal>convection>area>pick all

4. Tahap Pembebanan

Pada tahap ini, pembebanan pengelasan diberikan pada area pengelasan. Beban yang diberikan adalah heat flux yang diaplikasikan pada permukaan daerah lasan. Tahapan yang dipilih adalah,

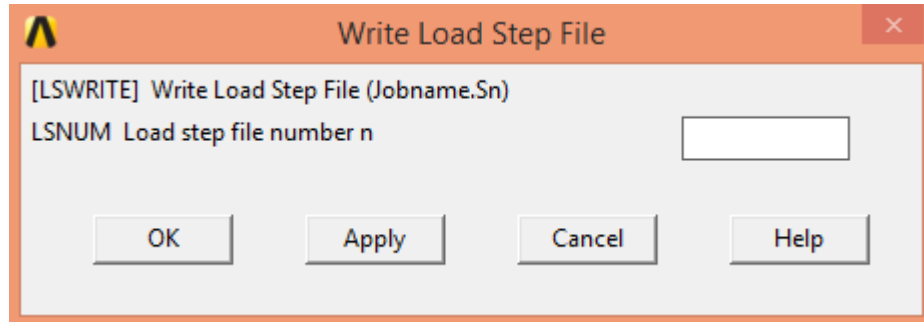
Solution>Define Loads> Apply> Heat Flux > pilih Area > OK

Pada setiap pembebanan yang telah diaplikasikan diberikan label waktu dan nomor pembebanan hingga semua permukaan luasan lasan. Perintah yang dilakukan untuk pemberian label waktu (*Time Step*) adalah,

Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time and Sub-steps

Sedangkan untuk memberikan nomer pembebanan (*Load Step*) adalah,

Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Write LS Files



Perintah pada sub-bab 3.3.2.3 diulang hingga semua beban heat flux diinputkan pada area weld.

5. Solusi Pembebanan

Ketika semua beban konveksi dan *heat flux* telah diaplikasikan. Maka tahap selanjutnya yang perlu dilakukan adalah melakukan penyelesaian dari step awal pembebanan hingga akhir pembebanan.

Solution>solve>from LS file>input load step> OK

A.3 SIMULASI TEGANGAN SISA

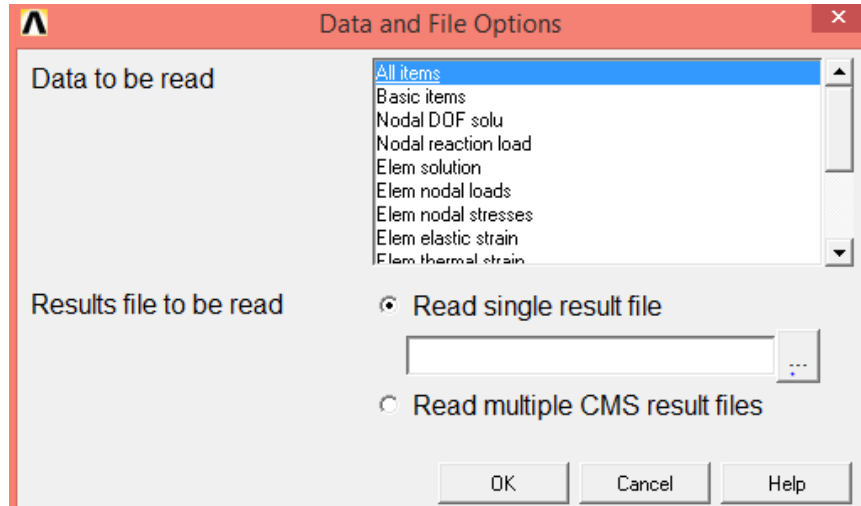
1. Preprocessor

Tahap ini merupakan tahap persiapan sebelum melakukan simulasi struktural. Dalam hal ini model dan beban termal pada analisa sebelumnya di import untuk dijadikan sebagai *initial load*. Namun pada analisa struktural perlu dilakukan perubahan jenis elemen terlebih dahulu dari elemen termal ke struktural. Perintah yang digunakan adalah

Preprocessor>Element Type>Switch Element>pilih ‘Thermal to Structural’ >OK

Selanjutnya perlu dilakukan import model termal yang mana jenis file yang diimportkan memiliki format *file.rst*. Perintah yang digunakan adalah,

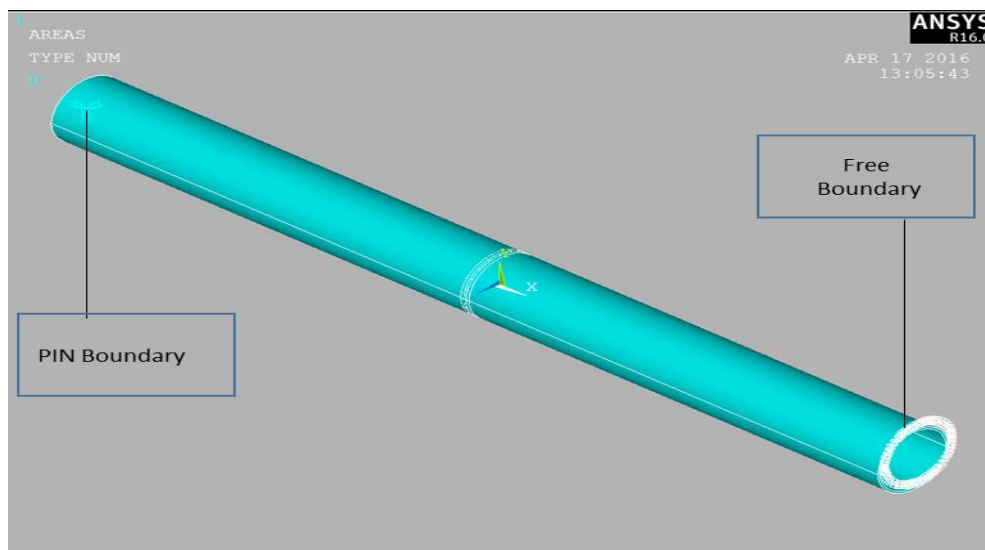
General Postproc>Data & File Opts > browse file > OK



2. Menentukan Kondisi Batas

Pada kondisi batas yang diaplikasikan pada analisa struktural adalah dengan memberikan tumpuan (*fixity*) pada model. Jenis tumpuan yang digunakan adalah pin dan Symetry Boundary Condition yang diaplikasikan pada area kedua ujung pipa. Perintah yang dilakukan adalah,

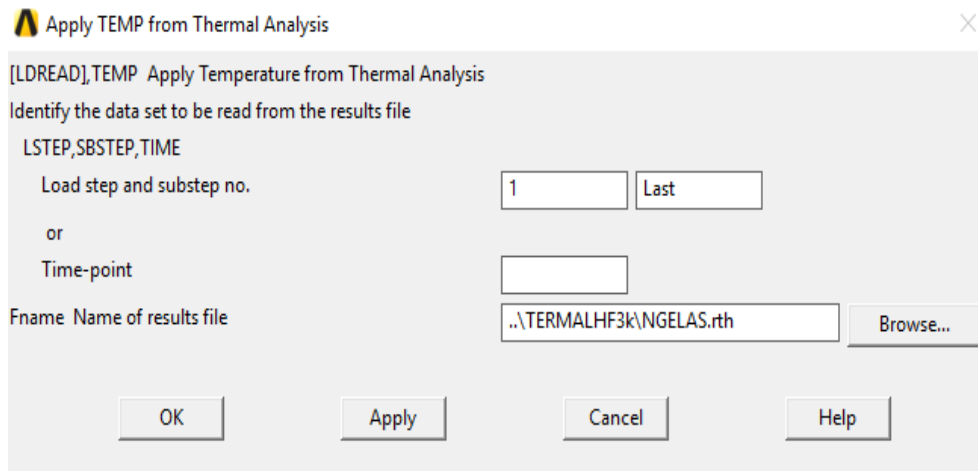
Solution>Define Load>Apply>Structural>Displacement



3. Tahap Pembebanan Struktural

Pada tahap ini dilakukan pembacaan hasil beban dari simulasi termal pada tiap-tiap Load Step pembebanan. Perintah yang dilakukan pada tahap ini adalah,

Solution>Define Load>Apply>Structural>Temperature>From Thermal Analy

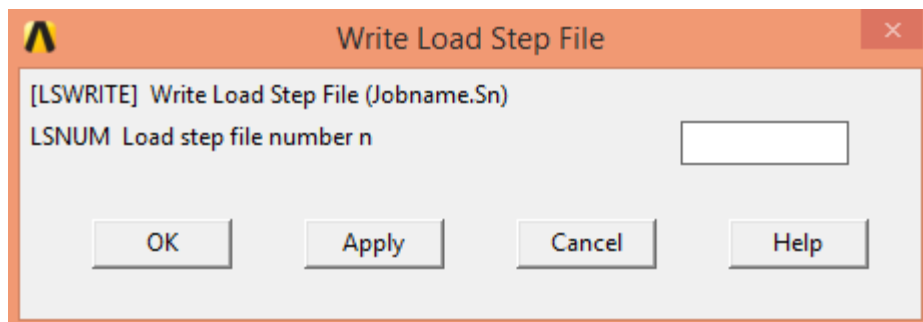


Pada setiap pembebanan yang telah diaplikasikan diberikan label waktu dan nomor pembebanan hingga semua permukaan luasan lasan. Perintah yang dilakukan untuk pemberian label waktu (*Time Step*) adalah,

Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time and Sub-steps

Sedangkan untuk memberikan nomer pembebanan (*Load Step*) adalah,

Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Write LS Files



Perintah pada sub-bab 3.3.2.3 diulang hingga semua beban heat flux diinputkan pada area weld.

4. Solusi Pembebanan Struktural

Ketika semua Load Step pada pembebanan struktural telah diinputkan tahap selanjutnya adalah melakukan solusi, dengan perintah sebagai berikut,

Solution>solve>From LS Files>Input Load Step>OK

LAMPIRAN B

DATA PEMODELAN

B.1 Data Welding Procedure Specification



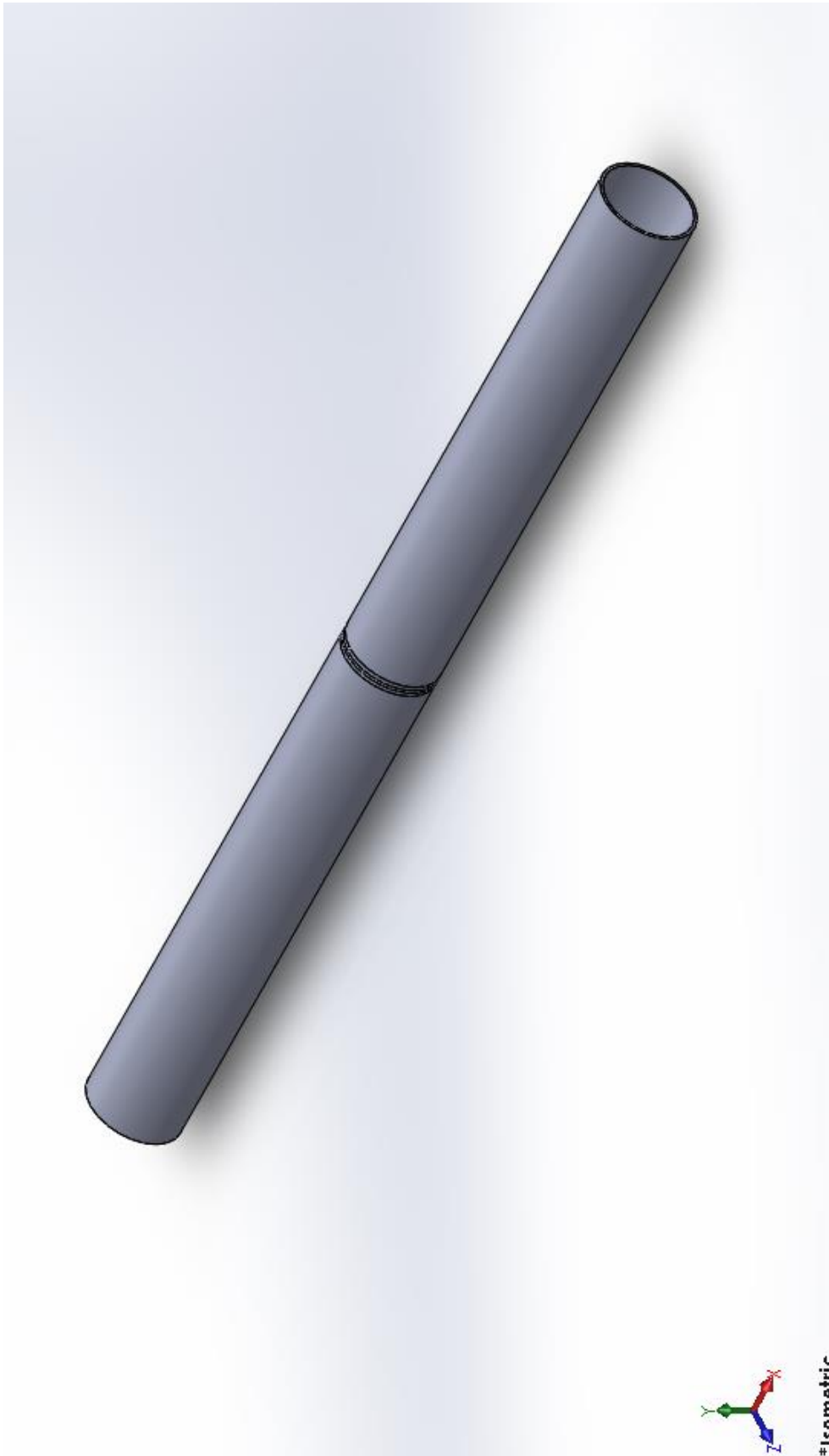
PT. DWISATU MUSTIKA BUMI

Gedung Gajah Unit R, Jl. Saharjo No. 111, Jakarta 12810
Tel : (+62) 021-8319801, 8293853

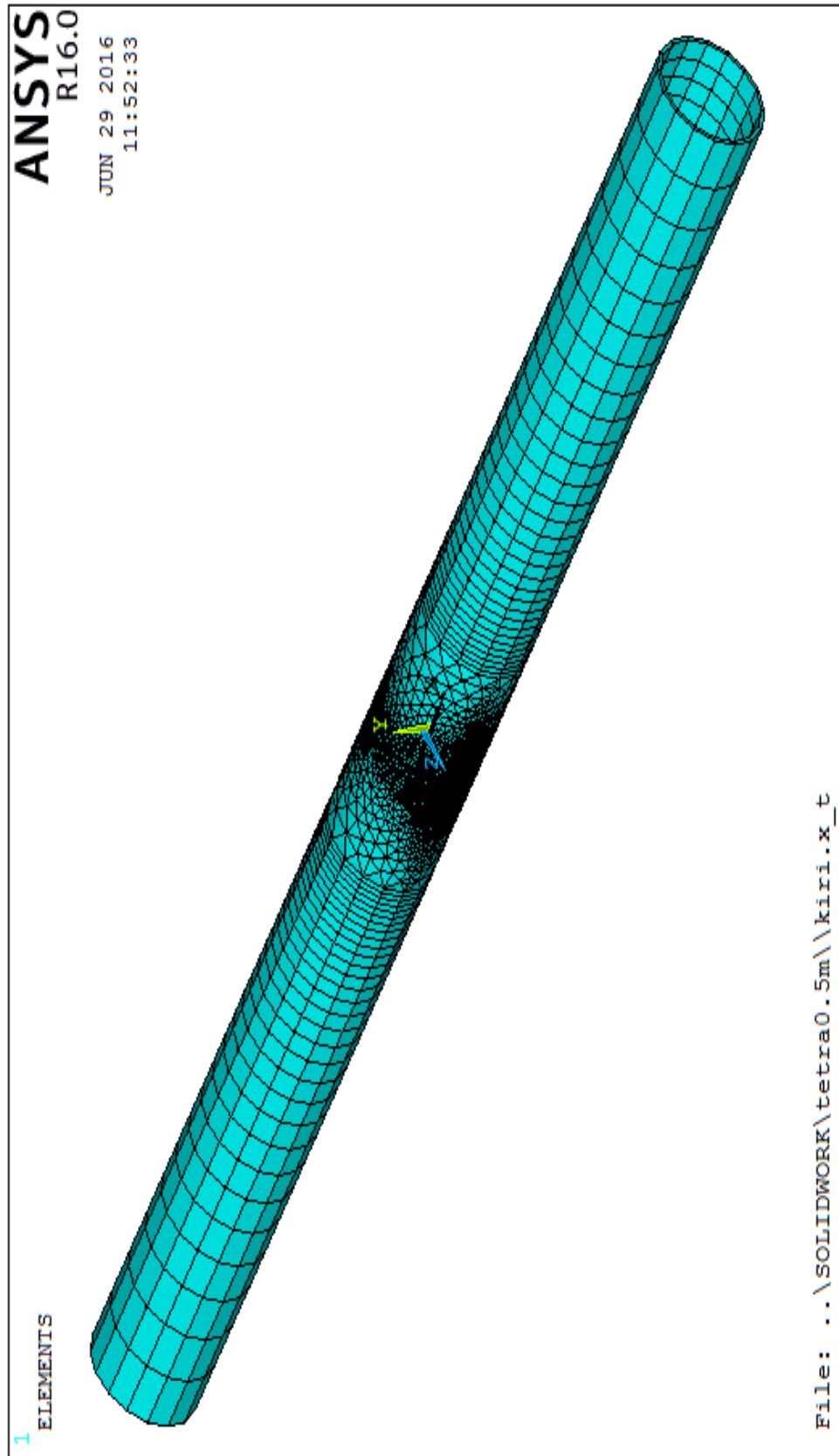
WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)									
MAIN PIPELINE									
In accordance with API 1104, 20- 1st edition 2013									
Company Name	PT. DWISATU MUSTIKA BUMI				Date	November 21, 2014			
WPS No.	001/WPS-API 1104/DMB/MAIN				Rev	1			
Supporting PQR No	001/PQR-API 1104/DMB/MAIN				Type(s)	Manual			
Applicable Code	API 1104 edition 2013								
Welding Process(es)	SMAW								
BASE METALS									
Specified Min. Yield Strength	52.000 psi to 52.000 psi				Type pipe product	SAW			
Specification Type and Grade	API 5L X52 PSL 2 to API 5L X52 PSL 2				OD x WT x Length	20" X 16 mm x 600 mm			
Material Group No (SMYS)	42.000 < SMYS < 65.000 to 42.000 < SMYS < 65.000				Diameter Range groups	> 12.750" (323.9 mm)			
Base Metal Grp Thick.Nominal	0.188"-0.750"(4.8 mm - 19.05 mm)								
FILLER METALS									
Trade name	Manufacture	AWS Classification	AWS Specification	Ø (mm)	Group				
Shield Arc HYP	Lincoln or Equal	E6010	A 5.1	3.2	1				
Shield Arc HYP	Lincoln or Equal	E7010-P1	A 5.5	3.2-4.0	1				
JOINT CONFIGURATION					JOINT DETAILS				
JOINT DESIGN Joint type : Butt Joint Groove type : Single 'V' Preparation : Cutting/Milling followed by grinding Bevel surface : Free from rust, oil, paint and other contamination					BACKING METHOD Alignment : Hammering or heating the pipes to adjust alignment is not permitted Pipe fit-up : Internal/External Line up Clamp ^(*) Other : -				
PREHEAT & INTERPASS					SHIELDING				
Preheat temperature : Min. 26 °C (Ambient) Interpass temperature : Max. 300° c Measuring method : Infrared Thermometer / Temperature stick Heating method : N/A Measurement location : 75 mm from weld bead					Type of gas : N/A Gas composition : N/A Flow rate : N/A Additional filler : N/A Other : N/A				
WELDING TECHNIQUES									
Welding position : 45° Fixed (6G Position) Progression : Root : Down Hill & Hot - Cap : Up Hill Stringer / weave : Stringer & weave beads (Max. 3 times diameter electrode) Weld Layer : Single and or multi pass					No. of welder : 2 for SMAW Time lapse, Max : 8 Minutes (To be qualified during PQR) Cleaning : Chipping, brushing & grinding (if required) Accelerated cooling : N/A Others : N/A				
WELDING PARAMETERS									
Pass No.	Welding Process	Filler Metal		Polarity	Direction	Current (A)	Voltage (V)	Travel Speed (mm/min)	Heat Input (KJ/mm)
Root Pass	SMAW	E6010	3.2	DCEP	Uphill	95 ~ 130	20-28	90-120	1.0-1.8
Hot Pass	SMAW	E6010	3.2-4.0	DCEP	Down Hill	110 ~ 150	22-30	100-140	1.1-2.2
Filler	SMAW	E7010-P1	3.2-4.0	DCEP	Down Hill	110 ~ 140	22-30	100-180	1.1-2.0
Capping	SMAW	E7010-P1	3.2-4.0	DCEP	Down Hill	100 ~ 140	22-30	100-180	1.1-1.8
Remark : * - Internal Clamp can be removed after completion of root pass circumference weld. * - External Clamp can be removed after completion of 50% root pass circumference weld.									
PT. Dwisatu Mustika Bumi Prepared By _____ Checked By _____					MIGAS Verified by, _____ No. Reg. 001/TS-01/WPS/2015 Mengetahui Kasubdit Standardisasi Migas Rusdiana Bardian NIP. 19580325 198703 2001				
Pokker Kadir QA/QC Coord.					Sintong WH Welding Engineer				

WPS/PQR HANYA BERLAKU PADA
PROYEK BU/BUT INI SAJA

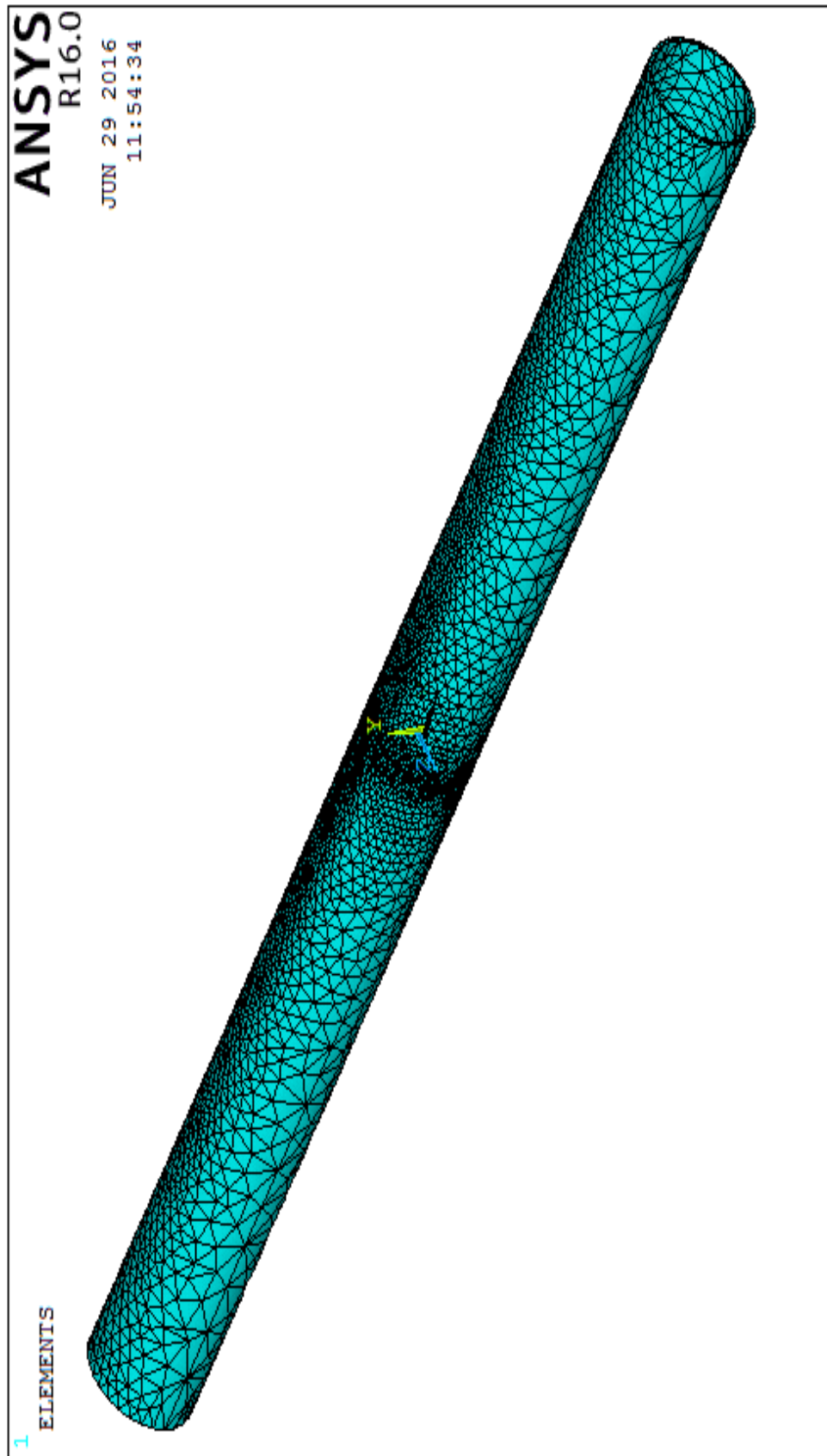
B.2 Model Pipa



B.3 Meshing Kombinasi Hexagonal dan Tetrahedral



B.4 Meshing Tetrahedral



LAMPIRAN C

DATA ANSYS

C.1 Data Script Termal Simulation

!!!Load Step 1

!!!APPLY KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42

FITEM,2,45

FITEM,2,-52

NEQIT,1000

!*

SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF

FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,16

NEQIT,1000

!*

SFA,P51X,1,HFLUX,3932063

!*

TIME,27

AUTOTS,0

NSUBST,2, , 1

KBC,1

!*

TSRES,ERASE

Load StepWRITE,1,

!!!DEL HF

FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14

FITEM,2,3787

FITEM,2,-3800

FITEM,2,3850

FITEM,2,3900

FITEM,2,4587

FITEM,2,-4600

FITEM,2,5336

FITEM,2,-5350

FITEM,2,5400

FITEM,2,5450

FITEM,2,6186

FITEM,2,-6262

FITEM,2,6325

FITEM,2,-34494

SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42

FITEM,2,45

FITEM,2,-52

SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 2

!!!APPLY KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42

FITEM,2,45

FITEM,2,-52

NEQIT,1000

!*

SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF

FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,14

NEQIT,1000

!*

SFA,P51X,1,HFLUX,3932063

!*
TIME,54
AUTOTS,0
NSUBST,2, , 1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,2,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 3
!!!APPLY KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,12
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,81
AUTOTS,0
NSUBST,2, , 1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,3,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186

FITEM,2,-6262
 FITEM,2,6325
 FITEM,2,-34494
 SFDELE,P51X,HFLUX

 !!!DEL KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!Load Step 4
 !!!APPLY KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,CONV,15,298

 !!!APPLY HF
 FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,10
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
 !*
 TIME,108
 AUTOTS,0
 NSUBST,2, , ,1
 KBC,1

!*
 TSRES,ERASE
 Load StepWRITE,4,

 !!!DEL HF
 FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
 FITEM,2,3787
 FITEM,2,-3800
 FITEM,2,3850
 FITEM,2,3900
 FITEM,2,4587
 FITEM,2,-4600
 FITEM,2,5336
 FITEM,2,-5350
 FITEM,2,5400
 FITEM,2,5450
 FITEM,2,6186
 FITEM,2,-6262
 FITEM,2,6325
 FITEM,2,-34494
 SFDELE,P51X,HFLUX

 !!!DEL KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!Load Step 5
 !!!APPLY KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42

FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,26
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,135
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,5,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 6
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,25
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,162
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,6,

!!!DEL HF

FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14

FITEM,2,3787

FITEM,2,-3800

FITEM,2,3850

FITEM,2,3900

FITEM,2,4587

FITEM,2,-4600

FITEM,2,5336

FITEM,2,-5350

FITEM,2,5400

FITEM,2,5450

FITEM,2,6186

FITEM,2,-6262

FITEM,2,6325

FITEM,2,-34494

SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42

FITEM,2,45

FITEM,2,-52

SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 7

!!!APPLY KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42

FITEM,2,45

FITEM,2,-52

NEQIT,1000

!*

SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF

FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,23

NEQIT,1000

!*

SFA,P51X,1,HFLUX,3932063

!*

TIME,189

AUTOTS,0

NSUBST,2, , 1

KBC,1

!*

TSRES,ERASE

Load StepWRITE,7,

!!!DEL HF

FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14

FITEM,2,3787

FITEM,2,-3800

FITEM,2,3850

FITEM,2,3900

FITEM,2,4587

FITEM,2,-4600

FITEM,2,5336

FITEM,2,-5350

FITEM,2,5400

FITEM,2,5450

FITEM,2,6186

FITEM,2,-6262

FITEM,2,6325

FITEM,2,-34494

SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 8
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,27
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,216
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,8,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900

FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 9
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,22
NEQIT,1000

```

!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,243
AUTOTS,0
NSUBST,2, , 1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,9,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

```

```

!!!Load Step 10
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,19
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,270
AUTOTS,0
NSUBST,2, , 1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,10,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400

```

FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 11
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,17
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,297
AUTOTS,0

NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,11,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 12
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32

FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,CONV,15,298

 !!!APPLY HF
 FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,15
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
 !*
 TIME,324
 AUTOTS,0
 NSUBST,2, , 1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 Load StepWRITE,12,

 !!!DEL HF
 FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
 FITEM,2,3787
 FITEM,2,-3800
 FITEM,2,3850
 FITEM,2,3900
 FITEM,2,4587
 FITEM,2,-4600
 FITEM,2,5336
 FITEM,2,-5350
 FITEM,2,5400
 FITEM,2,5450
 FITEM,2,6186
 FITEM,2,-6262
 FITEM,2,6325
 FITEM,2,-34494

SFDELE,P51X,HFLUX

 !!!DEL KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!Load Step 13
 !!!APPLY KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,CONV,15,298

 !!!APPLY HF
 FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,13
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
 !*
 TIME,351
 AUTOTS,0
 NSUBST,2, , 1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 Load StepWRITE,13,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 14
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000

!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,11
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,378
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,14,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1

FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 15
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,9
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,405
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,15,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800

FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262
FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 16
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,24
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
 !*
 TIME,432
 AUTOTS,0
 NSUBST,2, , 1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 Load StepWRITE,16,

 !!!DEL HF
 FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
 FITEM,2,3787
 FITEM,2,-3800
 FITEM,2,3850
 FITEM,2,3900
 FITEM,2,4587
 FITEM,2,-4600
 FITEM,2,5336
 FITEM,2,-5350
 FITEM,2,5400
 FITEM,2,5450
 FITEM,2,6186
 FITEM,2,-6262
 FITEM,2,6325
 FITEM,2,-34494
 SFDELE,P51X,HFLUX

 !!!DEL KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52

SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!Load Step 17
 !!!APPLY KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,CONV,15,298

 !!!APPLY HF
 FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,29
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
 !*
 TIME,459
 AUTOTS,0
 NSUBST,2, , 1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 Load StepWRITE,17,

 !!!DEL HF
 FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
 FITEM,2,3787
 FITEM,2,-3800
 FITEM,2,3850
 FITEM,2,3900
 FITEM,2,4587
 FITEM,2,-4600
 FITEM,2,5336

FITEM,2,-5350
 FITEM,2,5400
 FITEM,2,5450
 FITEM,2,6186
 FITEM,2,-6262
 FITEM,2,6325
 FITEM,2,-34494
 SFDELE,P51X,HFLUX

 !!!DEL KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!Load Step 18
 !!!APPLY KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,CONV,15,298

 !!!APPLY HF
 FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,21
 NEQIT,1000
 !*
 SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
 !*

TIME,486
 AUTOTS,0
 NSUBST,2, , ,1
 KBC,1
 !*
 TSRES,ERASE
 Load StepWRITE,18,

 !!!DEL HF
 FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
 FITEM,2,3787
 FITEM,2,-3800
 FITEM,2,3850
 FITEM,2,3900
 FITEM,2,4587
 FITEM,2,-4600
 FITEM,2,5336
 FITEM,2,-5350
 FITEM,2,5400
 FITEM,2,5450
 FITEM,2,6186
 FITEM,2,-6262
 FITEM,2,6325
 FITEM,2,-34494
 SFDELE,P51X,HFLUX

 !!!DEL KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-32
 FITEM,2,36
 FITEM,2,42
 FITEM,2,45
 FITEM,2,-52
 SFADELE,P51X,1,CONV

 !!!Load Step 19
 !!!APPLY KONV
 FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,20
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,513
AUTOTS,0
NSUBST,2, , 1
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
Load StepWRITE,19,

!!!DEL HF
FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14
FITEM,2,3787
FITEM,2,-3800
FITEM,2,3850
FITEM,2,3900
FITEM,2,4587
FITEM,2,-4600
FITEM,2,5336
FITEM,2,-5350
FITEM,2,5400
FITEM,2,5450
FITEM,2,6186
FITEM,2,-6262

FITEM,2,6325
FITEM,2,-34494
SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
SFADELE,P51X,1,CONV

!!!Load Step 20
!!!APPLY KONV
FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6
FITEM,2,1
FITEM,2,-32
FITEM,2,36
FITEM,2,42
FITEM,2,45
FITEM,2,-52
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,298

!!!APPLY HF
FLoad StepT,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,18
NEQIT,1000
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,3932063
!*
TIME,540
AUTOTS,0
NSUBST,2, , 1
KBC,1
!*
SFDELE,P51X,HFLUX

TSRES,ERASE

Load StepWRITE,20,

!!!DEL HF

FLoad StepT,2,28294,1,ORDE,14

FITEM,2,3787

FITEM,2,-3800

FITEM,2,3850

FITEM,2,3900

FITEM,2,4587

FITEM,2,-4600

FITEM,2,5336

FITEM,2,-5350

FITEM,2,5400

FITEM,2,5450

FITEM,2,6186

FITEM,2,-6262

FITEM,2,6325

FITEM,2,-34494

SFDELE,P51X,HFLUX

!!!DEL KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42

FITEM,2,45

FITEM,2,-52

SFADELE,P51X,1,CONV

!!!PENDINGINAN

!!!APPLY KONV

FLoad StepT,2,42,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-32

FITEM,2,36

FITEM,2,42

FITEM,2,45

FITEM,2,-52

NEQIT,1000

!*

SFA,P51X,1,CONV,15,298

TIME,7200

AUTOTS,0

NSUBST,63, , ,1

KBC,1

!*

TSRES,ERASE

Load StepWRITE,21,

Load StepCLEAR,ALL

C.2. Data Script Simulasi Struktural

!!! LOAD STEP 1

NEQIT,1000

LDREAD,TEMP,1,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*

OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*

OUTRES,ALL,ALL,

!*

NEQIT,3000

!*

!*

TIME,27

AUTOTS,0

NSUBST,2,0,0,0

KBC,1

!*

TSRES,ERASE

LSWRITE,1,

!!! LOAD STEP 2

LDREAD,TEMP,2,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*

OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*

OUTRES,ALL,ALL,

!*

NEQIT,3000

!*

!*

TIME,54

AUTOTS,0

NSUBST,2,0,0,0

KBC,1

!*

TSRES,ERASE

LSWRITE,2,

!!! LOAD STEP 3

LDREAD,TEMP,3,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*

OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*

OUTRES,ALL,ALL,

!*

NEQIT,3000

!*

!*

TIME,81

AUTOTS,0

NSUBST,2,0,0,0

KBC,1

!*

TSRES,ERASE

LSWRITE,3,

!!! LOAD STEP 4

LDREAD,TEMP,4,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*

OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*

OUTRES,ALL,ALL,

!*

NEQIT,3000

!*

!*

TIME,108
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0

KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,4,

!!! LOAD STEP 5

LDREAD,TEMP,5,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000

!*
!*
TIME,135

AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1

!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,5,

!!! LOAD STEP 6

LDREAD,TEMP,6,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000

NEQIT,3000

!*
!*
TIME,162

AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1

!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,6,

!!! LOAD STEP 7

LDREAD,TEMP,7,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000

!*
!*
TIME,189

AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1

!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,7,

!!! LOAD STEP 8

LDREAD,TEMP,8,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1

!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,216
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,8,

!!! LOAD STEP 9

LDREAD,TEMP,9,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,243
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,9,

!!! LOAD STEP 10

LDREAD,TEMP,10,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,270
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,10,

!!! LOAD STEP 11

LDREAD,TEMP,11,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,297
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,11,

!!! LOAD STEP 12

```

LDREAD,TEMP,12,LAST,      ,
,'NGELAS','rth',' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,324
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,12,

!!! LOAD STEP 13

LDREAD,TEMP,13,LAST,      ,
,'NGELAS','rth',' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,351
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE

```

```

LSWRITE,13,

!!! LOAD STEP 14

LDREAD,TEMP,14,LAST,      ,
,'NGELAS','rth',' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,378
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,14,

!!! LOAD STEP 15

LDREAD,TEMP,15,LAST,      ,
,'NGELAS','rth',' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,405
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0

```

KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,15,

!!! LOAD STEP 16

LDREAD,TEMP,16,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,432
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,16,

!!! LOAD STEP 17

LDREAD,TEMP,17,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
!*
!

TIME,459
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,17,

!!! LOAD STEP 18

LDREAD,TEMP,18,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
NEQIT,3000
!*
!*
TIME,486
AUTOTS,0
NSUBST,2,0,0,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,18,

!!! LOAD STEP 19

LDREAD,TEMP,19,LAST, ,
, 'NGELAS', 'rth', ' '
!*
OUTPR,ALL,ALL,
/GST,1
!*
OUTRES,ALL,ALL,
!*
!*
!

NEQIT,3000

!*
.*

TIME,513

AUTOTS,0

NSUBST,2,0,0,0

KBC,1

!*
.*

TSRES,ERASE

LSWRITE,19,

!!! LOAD STEP 20

LDREAD,TEMP,20,LAST, ,

, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*
.*

OUTPR,ALL,ALL,

/GST,1

!*
.*

OUTRES,ALL,ALL,

!*
.*

NEQIT,3000

!*
.*

!*
.*

TIME,540

AUTOTS,0

NSUBST,2,0,0,0

KBC,1

!*
.*

TSRES,ERASE

LSWRITE,20,

!!! LOAD STEP 21

LDREAD,TEMP,21,LAST, ,

, 'NGELAS', 'rth', ' '

!*
.*

OUTPR,ALL,ALL,

/GST,1

!*
.*

OUTRES,ALL,ALL,

!*
.*

NEQIT,3000

!*
.*

!*
.*

TIME,7200

AUTOTS,0

NSUBST,63,0,0,0

KBC,1

!*
.*

TSRES,ERASE

LSWRITE,21,

LAMPIRAN D

DATA PERHITUNGAN

D.1 Hasil Perhitungan HEAT FLUX

Keterangan	Nilai	Satuan
Arus	120	A
Tegangan	20	Volt
Travel Speed	3	mm/s
OD Elektroda	4	mm
Efisiensi SMAW	0,7	
Lebar Kampuh Las	16,63	mm
Panjang Elemen	79,7964534	mm
Lebar Elemen	16,63	mm

1 Menentukan Efektif Heat Input

$$Q = \eta U I$$

$$Q = 1680 \text{ Watt}$$

2 Menentukan Luas Elektroda

$$A_e = \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$A_e = 12,56637061 \text{ mm}^2$$

3 Heat Input Elektroda

$$q_e = \frac{Q}{A_e}$$

$$q_e = 133,6901522 \text{ Watt/mm}^2$$

4 Luas Area Pembebanan

$$A_f = b \times v \times t$$

$$A_f = 1327,01502 \text{ mm}^2$$

5 Menentukan Luas Elemen

$$A_l = p \times l$$

$$A_l = 39,02985353 \text{ mm}^2$$

6 Heat Flux

$$q_1 = q_e \frac{A_l}{A_f}$$

$$q_1 = 3,9320633 \text{ Watt/mm}^2$$

$$= 3,9 \text{E}+06 \text{ Watt/m}^2$$

D.2 Hasil Perhitungan Validasi Momen Kritis

σ_y	=	2,65E+08	Pa		
OD	=	508	mm	0,508	m
ID	=	476	mm	0,476	m
thickness	=	16	mm	0,016	m
Md	=	9,70E+05	N-m	(ANSYS)	
YSc	=	1,138			
Ym	=	1,15		(SLS)	
α_c	=	1,2			

1. Menentukan Momen Plastis

$$M_p = f_y \cdot (D - t_2)^2 \cdot t_2$$

$$M_p = 1026351 \text{ N-m}$$

2. Menentukan Kriteria Local Buckling

$$\left(\gamma_{SC} \gamma_m \left(\frac{M_d}{\alpha_c M_p} \right) + \gamma_{SC} \gamma_m \left(\frac{S_d}{\alpha_c S_p} \right)^2 \right)^2 + \left(\gamma_{SC} \gamma_m \left(\frac{p_e}{p_c} \right) \right)^2 \leq 1$$

$$\frac{\text{Momen Design}}{\text{Momen Ijin}} \leq 1$$

$$\frac{1269439}{1231621,632} \leq 1$$

$$1,06235351 \leq 1 \quad \textbf{(BUCKLING CRITERIA)}$$

D.3 Perhitungan Momen Vs Kurvatur

σ_y	=	2,65E+08 Pa	
OD	=	508 mm	0,508 m
ID	=	476 mm	0,476 m
thickness	=	16 mm	0,016 m
Dm	=	492 mm	0,492 m
E	=	1,98E+11 Pa	
M_y	=	8,06,E+05 N.m	
A	=	1,000000	
B	=	6,800000	

$$M_o = \frac{\pi}{4} \sigma_o d_m^2 t$$

$$I = \frac{\pi(D^4 - (D - 2t)^4)}{64}$$

$$I = 0,00074909 \text{ m}^4$$

$$K_y = \frac{2 \times SMYS}{ED}$$

$$K_y = 5,27E-03 /m$$

$$M_y = \frac{2 \times SMYS \times I}{D}$$

$$M_y = \begin{matrix} 7,815E+05 \text{ N.m} \\ 7,815E+02 \text{ kN.m} \\ 7,815E+08 \text{ N.mm} \end{matrix}$$

RAMBERG OSGOOD EQUATION

$$\frac{K}{K_y} = \frac{M}{M_y} + A \left(\frac{M}{M_y} \right)^B$$

D.4 Hasil Perhitungan Momen Kritis Dengan Pengaruh Pengelasan

No	M (KN.m)	M/My	A(M/My)B	K	K(1/mm)	K/Ky
1	0,00E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,000E+00
2	1,94E+01	2,482E-02	1,216E-11	1,31E-04	1,31E-07	2,482E-02
3	3,88E+01	4,965E-02	1,355E-09	2,62E-04	2,62E-07	4,965E-02
4	5,82E+01	7,447E-02	2,135E-08	3,92E-04	3,92E-07	7,447E-02
5	7,76E+01	9,929E-02	1,510E-07	5,23E-04	5,23E-07	9,929E-02
6	9,70E+01	1,241E-01	6,887E-07	6,54E-04	6,54E-07	1,241E-01
7	1,16E+02	1,489E-01	2,379E-06	7,85E-04	7,85E-07	1,489E-01
8	1,36E+02	1,738E-01	6,787E-06	9,16E-04	9,16E-07	1,738E-01
9	1,55E+02	1,986E-01	1,683E-05	1,05E-03	1,05E-06	1,986E-01
10	1,75E+02	2,234E-01	3,749E-05	1,18E-03	1,18E-06	2,234E-01
11	1,94E+02	2,482E-01	7,674E-05	1,31E-03	1,31E-06	2,483E-01
12	2,13E+02	2,731E-01	1,467E-04	1,44E-03	1,44E-06	2,732E-01
13	2,33E+02	2,979E-01	2,651E-04	1,57E-03	1,57E-06	2,981E-01
14	2,52E+02	3,227E-01	4,569E-04	1,70E-03	1,70E-06	3,232E-01
15	2,72E+02	3,475E-01	7,563E-04	1,84E-03	1,84E-06	3,483E-01
16	2,91E+02	3,723E-01	1,209E-03	1,97E-03	1,97E-06	3,736E-01
17	3,10E+02	3,972E-01	1,875E-03	2,10E-03	2,10E-06	3,990E-01
18	3,30E+02	4,220E-01	2,832E-03	2,24E-03	2,24E-06	4,248E-01
19	3,49E+02	4,468E-01	4,177E-03	2,38E-03	2,38E-06	4,510E-01
20	3,69E+02	4,716E-01	6,033E-03	2,52E-03	2,52E-06	4,777E-01
21	3,88E+02	4,965E-01	8,551E-03	2,66E-03	2,66E-06	5,050E-01
22	4,07E+02	5,213E-01	1,192E-02	2,81E-03	2,81E-06	5,332E-01
23	4,27E+02	5,461E-01	1,635E-02	2,96E-03	2,96E-06	5,625E-01
24	4,46E+02	5,709E-01	2,212E-02	3,12E-03	3,12E-06	5,930E-01
25	4,66E+02	5,958E-01	2,954E-02	3,29E-03	3,29E-06	6,253E-01
26	4,85E+02	6,206E-01	3,899E-02	3,48E-03	3,48E-06	6,596E-01
27	5,04E+02	6,454E-01	5,091E-02	3,67E-03	3,67E-06	6,963E-01
28	5,24E+02	6,702E-01	6,581E-02	3,88E-03	3,88E-06	7,360E-01
29	5,43E+02	6,950E-01	8,427E-02	4,11E-03	4,11E-06	7,793E-01
30	5,63E+02	7,199E-01	1,070E-01	4,36E-03	4,36E-06	8,269E-01
31	5,82E+02	7,447E-01	1,347E-01	4,63E-03	4,63E-06	8,794E-01
32	6,01E+02	7,695E-01	1,684E-01	4,94E-03	4,94E-06	9,379E-01
33	6,21E+02	7,943E-01	2,089E-01	5,29E-03	5,29E-06	1,003E+00
34	6,40E+02	8,192E-01	2,576E-01	5,67E-03	5,67E-06	1,077E+00
35	6,60E+02	8,440E-01	3,156E-01	6,11E-03	6,11E-06	1,160E+00
36	6,79E+02	8,688E-01	3,843E-01	6,60E-03	6,60E-06	1,253E+00
37	6,98E+02	8,936E-01	4,655E-01	7,16E-03	7,16E-06	1,359E+00
38	7,18E+02	9,185E-01	5,608E-01	7,79E-03	7,79E-06	1,479E+00
39	7,37E+02	9,433E-01	6,723E-01	8,51E-03	8,51E-06	1,616E+00
40	7,57E+02	9,681E-01	8,022E-01	9,33E-03	9,33E-06	1,770E+00

41	7,76E+02	9,929E-01	9,528E-01	1,03E-02	1,03E-05	1,946E+00
42	7,95E+02	1,018E+00	1,127E+00	1,13E-02	1,13E-05	2,145E+00
43	8,15E+02	1,043E+00	1,328E+00	1,25E-02	1,25E-05	2,370E+00
44	8,34E+02	1,067E+00	1,558E+00	1,38E-02	1,38E-05	2,626E+00
45	8,54E+02	1,092E+00	1,822E+00	1,54E-02	1,54E-05	2,914E+00
46	8,73E+02	1,117E+00	2,123E+00	1,71E-02	1,71E-05	3,240E+00
47	8,92E+02	1,142E+00	2,465E+00	1,90E-02	1,90E-05	3,607E+00
48	9,12E+02	1,167E+00	2,853E+00	2,12E-02	2,12E-05	4,020E+00
49	9,31E+02	1,192E+00	3,292E+00	2,36E-02	2,36E-05	4,483E+00
50	9,51E+02	1,216E+00	3,787E+00	2,64E-02	2,64E-05	5,004E+00
51	9,70E+02	1,241E+00	4,345E+00	2,94E-02	2,94E-05	5,586E+00
52	8,73E+02	1,117E+00	2,123E+00	1,71E-02	1,71E-05	3,240E+00

D.5 Hasil Perhitungan Momen Kritis tanpa Pengaruh Pengelasan

NO	M (KN.m)	M/My	A(M/My)B	K	K(1/mm)	K/Ky
1	0,00E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,000E+00
2	1,83E+01	2,347E-02	8,297E-12	1,24E-04	1,24E-07	2,347E-02
3	3,71E+01	4,753E-02	1,008E-09	2,50E-04	2,50E-07	4,753E-02
4	5,60E+01	7,160E-02	1,635E-08	3,77E-04	3,77E-07	7,160E-02
5	7,48E+01	9,567E-02	1,173E-07	5,04E-04	5,04E-07	9,567E-02
6	9,36E+01	1,197E-01	5,394E-07	6,31E-04	6,31E-07	1,197E-01
7	1,12E+02	1,438E-01	1,875E-06	7,58E-04	7,58E-07	1,438E-01
8	1,31E+02	1,679E-01	5,369E-06	8,85E-04	8,85E-07	1,679E-01
9	1,50E+02	1,919E-01	1,335E-05	1,01E-03	1,01E-06	1,919E-01
10	1,69E+02	2,160E-01	2,980E-05	1,14E-03	1,14E-06	2,160E-01
11	1,88E+02	2,401E-01	6,113E-05	1,27E-03	1,27E-06	2,401E-01
12	2,06E+02	2,641E-01	1,171E-04	1,39E-03	1,39E-06	2,643E-01
13	2,25E+02	2,882E-01	2,118E-04	1,52E-03	1,52E-06	2,884E-01
14	2,44E+02	3,123E-01	3,654E-04	1,65E-03	1,65E-06	3,126E-01
15	2,63E+02	3,363E-01	6,055E-04	1,78E-03	1,78E-06	3,369E-01
16	2,82E+02	3,604E-01	9,687E-04	1,90E-03	1,90E-06	3,614E-01
17	3,00E+02	3,845E-01	1,504E-03	2,03E-03	2,03E-06	3,860E-01
18	3,19E+02	4,085E-01	2,272E-03	2,16E-03	2,16E-06	4,108E-01
19	3,38E+02	4,326E-01	3,353E-03	2,30E-03	2,30E-06	4,360E-01
20	3,57E+02	4,567E-01	4,846E-03	2,43E-03	2,43E-06	4,615E-01
21	3,76E+02	4,807E-01	6,871E-03	2,57E-03	2,57E-06	4,876E-01
22	3,95E+02	5,048E-01	9,579E-03	2,71E-03	2,71E-06	5,144E-01
23	4,13E+02	5,289E-01	1,315E-02	2,86E-03	2,86E-06	5,420E-01
24	4,32E+02	5,530E-01	1,779E-02	3,01E-03	3,01E-06	5,707E-01
25	4,51E+02	5,770E-01	2,377E-02	3,17E-03	3,17E-06	6,008E-01
26	4,70E+02	6,011E-01	3,138E-02	3,33E-03	3,33E-06	6,325E-01
27	4,89E+02	6,252E-01	4,099E-02	3,51E-03	3,51E-06	6,662E-01
28	5,07E+02	6,492E-01	5,301E-02	3,70E-03	3,70E-06	7,022E-01
29	5,26E+02	6,733E-01	6,786E-02	3,91E-03	3,91E-06	7,411E-01
30	5,45E+02	6,973E-01	8,618E-02	4,13E-03	4,13E-06	7,835E-01
31	5,64E+02	7,214E-01	1,086E-01	4,37E-03	4,37E-06	8,300E-01
32	5,83E+02	7,455E-01	1,357E-01	4,64E-03	4,64E-06	8,812E-01
33	6,01E+02	7,696E-01	1,685E-01	4,94E-03	4,94E-06	9,380E-01
34	6,20E+02	7,936E-01	2,076E-01	5,28E-03	5,28E-06	1,001E+00
35	6,39E+02	8,177E-01	2,544E-01	5,65E-03	5,65E-06	1,072E+00
36	6,58E+02	8,418E-01	3,099E-01	6,07E-03	6,07E-06	1,152E+00
37	6,77E+02	8,658E-01	3,755E-01	6,54E-03	6,54E-06	1,241E+00
38	6,96E+02	8,899E-01	4,525E-01	7,07E-03	7,07E-06	1,342E+00
39	7,14E+02	9,139E-01	5,423E-01	7,67E-03	7,67E-06	1,456E+00
40	7,33E+02	9,380E-01	6,472E-01	8,35E-03	8,35E-06	1,585E+00

41	7,52E+02	9,621E-01	7,689E-01	9,12E-03	9,12E-06	1,731E+00
42	7,71E+02	9,862E-01	9,096E-01	9,99E-03	9,99E-06	1,896E+00
43	7,90E+02	1,010E+00	1,072E+00	1,10E-02	1,10E-05	2,082E+00
44	8,08E+02	1,034E+00	1,258E+00	1,21E-02	1,21E-05	2,292E+00
45	8,27E+02	1,058E+00	1,471E+00	1,33E-02	1,33E-05	2,529E+00
46	8,46E+02	1,082E+00	1,714E+00	1,47E-02	1,47E-05	2,796E+00
47	8,65E+02	1,107E+00	1,990E+00	1,63E-02	1,63E-05	3,097E+00
48	8,84E+02	1,131E+00	2,304E+00	1,81E-02	1,81E-05	3,435E+00
49	9,02E+02	1,155E+00	2,658E+00	2,01E-02	2,01E-05	3,813E+00
50	9,21E+02	1,179E+00	3,058E+00	2,23E-02	2,23E-05	4,237E+00
51	9,40E+02	1,203E+00	3,509E+00	2,48E-02	2,48E-05	4,712E+00
52	8,46E+02	1,082E+00	1,714E+00	1,47E-02	1,47E-05	2,797E+00
53	7,52E+02	9,622E-01	7,696E-01	9,13E-03	9,13E-06	1,732E+00
54	6,58E+02	8,419E-01	3,104E-01	6,07E-03	6,07E-06	1,152E+00
55	5,64E+02	7,217E-01	1,088E-01	4,38E-03	4,38E-06	8,305E-01
56	4,70E+02	6,014E-01	3,149E-02	3,33E-03	3,33E-06	6,329E-01
57	3,76E+02	4,811E-01	6,906E-03	2,57E-03	2,57E-06	4,880E-01
58	2,82E+02	3,608E-01	9,765E-04	1,91E-03	1,91E-06	3,618E-01
59	1,88E+02	2,406E-01	6,198E-05	1,27E-03	1,27E-06	2,406E-01
60	9,40E+01	1,203E-01	5,562E-07	6,34E-04	6,34E-07	1,203E-01
61	0,00E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,000E+00

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Dari hasil simulasi pengelasan dihasilkan tegangan sisa yang berupa tegangan memanjang (longitudinal) dan tangensial (hoop) yang mana nilai tegangan signifikan terjadi pada daerah sambungan pada pengecekan 0° , 90° , 180° , dan 270° dengan harga tegangan sisa terbesar arah memanjang terhadap tegangan yield berturut-turut adalah 0,83 ; 0,77 ; 0,72 ; 0,55. Sedangkan untuk perbandingan tegangan tangensial terbesar terhadap tegangan yield adalah 0,93 ; 0,79 ; 0,70 ; 0,68.
2. Dari hasil simulasi buckling pada kedua model pipa menunjukkan bahwa, pada pipa dengan pengaruh tegangan sisa diperoleh momen kritis sebesar 940 kN.m dan pada pipa tanpa pengaruh tegangan sisa diperoleh momen kritis sebesar 970 kN.m.
3. Analisa momen kurvatur menunjukkan bahwa pipa dengan pengaruh tegangan sisa memiliki kapasitas regangan yang lebih rendah terhadap pipa tanpa pengaruh tegangan sisa dengan faktor pengali sebesar 0.84.

5.2 Saran

Saran dalam penelitian ini adalah,

1. Dilakukan penelitian dengan membandingkan respon buckling pada beberapa jenis ketebalan.
2. Dilakukan penelitian dengan mengkombinasikan beban internal, aksial, dan momen untuk menentukan *Local Buckling*.
3. Pemodelan dilakukan dengan melibatkan variasi *ovality* yang terjadi pada pipa sebagai misalignment.
4. Penentuan variasi tumpuan sebagaimana kondisi pengelasan di lapangan, laboratorium, dan operasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Showaiter, dkk. 2015. Effect of Misalignment and Weld Induced Residual Stresses on The Local Buckling Response of Pipelines. *Journal of Dalhousie University*, Canada.
- ANSYS. 2016. ANSYS Manual. Release 16, Ansys Inc.
- Boresi, P. Arthur. 2003. Advanced Mechanics of Materials. John Wiley & Sons, inc : USA.
- Baek, J.H. 2015. *Reliability Evaluation of Offshore Pipeline with Geometri Imperfection*. International Conference on Material and Reliability.
- Cao, Yuguang et al. 2013. FEM Study on Stress Concentration Factor on Tubular K-Joint with Welding Residual Stress. *Journal Elsevier*. Applied Ocean Research.
- Chi Fai, Paul Ng. 1994. *Behaviour of Burried Pipelines Subjected to External Loading*. Thesis Doctoral, University Sheffield.
- Darmadi, B. DJarot. 2014. *Residual Stress Analysis of Pipeline Girth Weld Joints*. Thesis Doctoral, University of Wollongong.
- Det Norske Veritas. 2000. Submarine Pipeline Systems OS-F101.
- Harsono, et al. 2000. *Teknologi Pengelasan Logam*. PT. Pradnya Paramita : Jakarta
- Ghodsi, Nader Yosef dkk. 1994. *Behavior of Girth-Welded Line Pipe*. Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- Lee, Chin-Hyung. 2013. Study on The residual Stresses in Girth-Welded Steel Pipe and Their Evolution Under Internal Pressure. *Journal Elsevier*. Marine Structure.
- Logan, Daryl L. 2007. *First Course in The Finite Element Method*. Thomson : Canada.
- Masubuchi, Koichi. 1980. *Analysis of Welded Structure*. Pergamon Press : USA.
- Pilipenko, A. 2001. *Computer Simulation of Residual Stress And Distortion of Thick Plates in Multielectrode Submerged Arc Welding*. Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology.

Roberto, Paulo. 2014. Study of The Gaussian Distribution Heat Source Model Applied to Numerical Thermal Simulations of TIG Welding Process. *Science and Engineering Journal*.

Turner. 1956. Stifness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of Aeronautical science*.

Alhamdulillah buku penelitian ini dapat terselesaikan dengan tepat waktu.

Terimakasih Ya Allah, subhanallah



Penulis merupakan mahasiswa yang kreatif dan produktif dalam berbagai kegiatan. Di tahun pertama dan kedua penulis aktif diberbagai kegiatan seperti, UKM Maritime Challenge dan Organisasi HIMATEKLA. Dengan gigihnya mampu membagi waktu antara kuliah dan organisasi. Dan di tahun ketiga dan ke empat penulis mulai masuk ke dunia karya tulis ilmiah yakni Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) yang mengantarkan penulis hingga didanai oleh DIKTI sebanyak 2 kali. Dan hingga tersusunnya penelitian ini, penulis telah aktif menyelesaikan berbagai pengalaman kerja yang diamanahkan PT. ITS Kemitraan dalam menyelesaikan proyek milik TOTAL E&P, PT. PAL Indonesia, dan Dinas Perhubungan Laut. Dalam perjalanan untuk kerja praktek-nya penulis telah menyelesaikannya di PT. Global Process System Batam. Maka dari itulah berkat pengalaman-pengalaman yang diperoleh penulis dari perkuliahan dan pengalaman proyek, penulis mampu menyusun buku tugas akhir ini dengan kelancaran dan kemudahan. *Alhamdulillah...*

Kontak dengan penulis dapat menghubungi di,

HP/WS: 089677954377

Email : dannysatria23@gmail.com

Line : dantesw